



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN FILOSOFÍA DE LA CIENCIA
Comunicación de la Ciencia

Los problemas filosóficos de la física cuántica a través de los textos de divulgación

TESIS

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

PRESENTA:

Pamela Geraldine Olivo Montaña

TUTORES

Dr. Shahen Hacyan Saleryan
Instituto de Física

Dr. Elias Okon Gurvich
Instituto de Investigaciones Filosóficas

COMITÉ TUTOR

Dra. Ana María Sánchez Mora
Dirección General de Divulgación de la Ciencia

Dra. Gisela Tamhara Mateos González
Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades

Dr. Alberto Güijosa Hidalgo
Instituto de Ciencias Nucleares

xico, D.F., agosto 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

A mi familia, padres y hermanos, por su apoyo incondicional.

A mis amigos, por su presencia.

A mis tutores, Dr. Shahen Hacyan y Dr. Elías Okon, por el apoyo, el tiempo, las revisiones y la enseñanza brindada durante el proceso del presente trabajo.

A mis sinodales, Dra. Ana María, Dra. Gisela Mateos y al Dr. Alberto Güijosa, por la lectura y sus valiosas observaciones.

A la institución del CONACYT, por el subsidio económico brindado durante la maestría.

Índice

Introducción	3
1. LA DIVULGACIÓN DE LA FÍSICA	7
a. Antecedentes de la divulgación de la física	8
b. Objetivos de la divulgación de la física cuántica	11
c. Descripción general de los textos a analizar	13
2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA TEORÍA CUÁNTICA PRESENTES EN LOS TEXTOS DIVULGATIVOS	18
a. Problema de la radiación del cuerpo negro (o catástrofe ultravioleta).....	18
- Solución de Planck	22
b. Einstein y el efecto fotoeléctrico	25
- Efecto Compton	28
c. Modelo atómico de Bohr.....	31
3. RASGOS ESENCIALES DE LA FÍSICA CUÁNTICA A TRAVÉS DE LA DIVULGACIÓN	35
a. Principio de Indeterminación o incertidumbre de Heisenberg	35
b. Debate entre Bohr y Einstein	47
- Interpretación de Copenhague.....	50
- Artículo EPR	63
c. Paradoja del gato de Schrödinger	71
Conclusiones.....	77
Bibliografía	84
Figura 1: Experimento de interferencia con balas	60
Figura 2: Experimento de interferencia con ondas de agua	61
Figura 3: Experimento de Interferencia con electrones	63

Introducción

Actualmente, una de las preocupaciones de la investigación científica considerada por algunos es difundir el conocimiento centralizado en unos pocos hacia la sociedad en general, y así establecer formas en las que la población adquiera un conocimiento más íntegro de la realidad que le rodea.

Respecto a esto, podemos remitirnos, desde un punto de vista sociológico, a Peter Berger y Thomas Luckmann (2005), quienes mencionan que la realidad se trata de una construcción social, siendo el conocimiento humano de cada individuo lo que permite construir una visión del mundo. Considerando lo anterior, el lenguaje permitirá una objetivación de la variedad de experiencias de los individuos, posibilitando la comunicación entre las diferentes esferas de realidades. Es decir, a través del lenguaje se logra la comunicación entre los individuos de distintas perspectivas o realidades, y a la vez, el entendimiento de esas distintas realidades.

En este sentido, se podrá considerar la ciencia como una realidad que tiene su propio lenguaje, o en palabras de Ana María Sánchez (2011, p. 23), “se tratará de una esfera en la que se maneja un lenguaje científico que contiene una carga teórica que refleja una visión muy particular del mundo”. Sin embargo, esto no impide que exista comunicación con otras esferas, como las de la vida cotidiana.

Estas visiones muy particulares del mundo se pueden observar en el hecho de que el desarrollo de la ciencia es perceptible a nuestro alrededor, y a pesar de ello, muchas personas lo desconocen o sienten apatía hacia el término ‘ciencia’, lo cual puede deberse a la incompatibilidad de lenguajes. De acuerdo a esto, Fayard (2004, p. 27) se refiere al lenguaje especializado como “un tesoro compartido por los iniciados que actúa también como un repelente del profano”.

Es entonces a través del lenguaje que se puede crear un vínculo entre esas distintas esferas. Con la comunicación de la ciencia se busca recrear la realidad científica con elementos de la realidad cotidiana, promoviendo así el entendimiento de la realidad científica

en personas que viven inmersas en la realidad cotidiana (Del Río, 2003, p. 15).

Para hacer mención de la importancia que tiene la comunicación de la ciencia para la sociedad, así como para la ciencia misma, podemos remitirnos al desarrollo que ésta ha tenido en los tiempos actuales. Su desarrollo se va dando a una velocidad muy rápida, tan rápida y compleja que es difícil esperar que la sociedad en general la asimile, por lo que su entendimiento se ve reducido a un grupo pequeño, particularmente de los científicos, que son los que directamente se relacionan a estos avances.

Es aquí donde entra en juego la comunicación de la ciencia, que intenta acercar estos avances de la ciencia con la sociedad. La comunicación de la ciencia en las distintas formas en las que se presenta (conferencias, periódicos, revistas, libros, exposiciones, programas de radio y televisión, etc.) permite estimular la curiosidad de quienes la perciben, expandiendo el bagaje cultural y despertando interés por el conocer más a fondo alguna ciencia en particular. Además, actúa como mediadora entre la población y los científicos, proporcionando herramientas para que la sociedad genere una opinión sobre los avances que se presentan en la ciencia.

Es la relación entre ciencia y sociedad donde la comunicación científica desempeña un papel fundamental en la cultura de la actualidad. En primer lugar, porque es la principal fuente de donde puede nutrirse la gente interesada que no es especialista en las ciencias, para tener idea de los conocimientos científicos. Segundo, porque es la principal responsable en la formación de la opinión pública sobre la ciencia. Esa imagen es importante, pues se trata de la idea que la población en general tiene acerca de lo qué es la ciencia, de por qué la ciencia importa, por qué puede confiar en ella y por qué es aceptable gastar socialmente en ella como menciona León Olivé (2000, p. 67). Tercero, permite formular los logros de la ciencia en lenguajes específicos que aseguran la continuidad de la transmisión de conocimientos. Para lograr una eficiente comunicación es necesario comprender la materia prima: la ciencia (Fayard, 2004, p. 23).

En el presente escrito, la ciencia que se estudiará será la física, en específico la física cuántica. Algunos textos de divulgación dedicados a esta ciencia se tomarán como muestra para explicar cómo se exponen ciertos aspectos que han representado problemáticas filosóficas a un público no especializado. Las cuestiones filosóficas implícitas en la física cuántica formarán el hilo conductor para el desenvolvimiento del presente texto.

Una de las razones de considerar la física se debe a que, por ser la base teórica de los avances tecnológicos que se han obtenido en los últimos años, ha representado transformaciones en la ciencia y en la cultura, por el impacto que estas tecnologías han tenido en la vida cotidiana de la sociedad, por su presencia en la investigación y a su vez en los sectores de economía y desarrollo. Asimismo, ha significado una fuente de cambios conceptuales en la forma de comprender e imaginar el mundo. Fue con la llegada de la teoría de la relatividad y la física cuántica que se generaron dichos cambios conceptuales y, por lo tanto, una nueva perspectiva de la realidad.

En el caso de la física cuántica, para comprender los razonamientos en los que se enfoca es necesario que nos desprendamos de ciertos esquemas a los que estamos acostumbrados en la vida cotidiana; en esta última, ocurren sucesos que para ser descritos se acude a la física clásica. No obstante, para referirnos al mundo de lo considerablemente pequeño, las leyes de la física clásica no funcionan y se aplican las de la física cuántica. De esta manera, se puede afirmar que actualmente no puede esperarse que una ley que es establecida para la escala media (en la que estamos inmersos los seres humanos) sea aplicable también en otras escalas.

Por otra parte, comunicar la física cuántica, ciencia considerada una gran construcción conceptual del siglo XX, tiene implícitas de alguna manera las mismas problemáticas epistemológicas que tuvo en su construcción. Buscar su entendimiento implica el despegarse del sentido común, situación que provoca turbación en el pensamiento al representar ideas antiintuitivas.

Con respecto a lo anterior cabría la pregunta: ¿puede comprenderse aquello de lo que no tenemos vivencia? Ante esta cuestión acogeremos una respuesta positiva para incluir los textos divulgativos que pretenden transmitir contenidos de la teoría cuántica, capaces de despertar curiosidad hacia las paradojas aparentes que se encuentran en los fundamentos de esta teoría.

El presente trabajo se encuentra dividido en tres secciones; la primera de ellas busca dar una clase de justificación del por qué hacer divulgación de la física cuántica, con base en las consideraciones que aportan los propios autores de los textos retomados que presentan ciertos tópicos de la física cuántica. Para ello, es preciso recurrir a un esbozo de dichos autores y textos.

En la segunda sección, se presenta cuáles fueron las circunstancias dentro de la física que

permitieron la creación de las nuevas teorías que pretenden dar cuenta del comportamiento de la naturaleza a escalas microscópicas. En específico, se expone el problema de la radiación del cuerpo negro que se presentó en el campo de la física a principios del siglo XX. En esta época se pretendía que la solución a dicho problema se derivara de algunas modificaciones en las teorías ya establecidas. Esta problemática fue solucionada por Planck en 1900; sin embargo, su aportación desencadenaría polémica entre los físicos por implicar ideas distintas a las de la física clásica. Asimismo, se presentan aquellos trabajos realizados por Einstein y Bohr a partir de la solución dada por Planck, mostrando que dichas investigaciones representaron trabajos preliminares para lo que hoy se considera física cuántica. A partir de esta sección se hace alusión a los textos de divulgación elegidos, mostrando cómo es que en ellos se expresan estos tópicos.

Por otra parte, en la sección tercera se exponen tres temáticas que dentro de la física cuántica han sido consideradas problemáticas filosóficas. Éstas son: *a)* principio de indeterminación o incertidumbre de Heisenberg; *b)* debate entre Bohr y Einstein; y *c)* paradoja del gato de Schrödinger. En este apartado se pretende mostrar por qué dichas temáticas se han planteado filosóficamente, además de exponer si son presentadas como tal, es decir, si dentro de los textos de divulgación seleccionados se hace explícita su relación con la filosofía.

De esta manera el presente trabajo pretende ser meramente expositivo y descriptivo, de manera que exponga la forma de presentar temas relacionados con la física cuántica y la filosofía en los textos divulgativos.

1. LA DIVULGACIÓN EN LA FÍSICA

Antes de abordar la divulgación de la física, brevemente se expondrán algunas cuestiones conceptuales relacionadas con la comunicación de la ciencia; seguido a ello se hablará de manera general de los escritos que se pueden considerar antecedentes en la divulgación de la física. Asimismo, dentro de esta sección, se verán los objetivos manifestados por los autores de las obras de divulgación de física cuántica. Al final de la sección, se hará una presentación general de los textos elegidos para el desarrollo de la presente investigación.

En lo que respecta a la comunicación de la ciencia, ésta se entenderá de manera general como aquella actividad en la que se transmite información de contenido científico, con el objetivo de que éste pueda ser comprendido por un público que no necesariamente esté involucrado en el área. Cabe advertir que este tipo de definición es cambiante debido al crecimiento que se observa en la comunicación de la ciencia.

Entre las actividades que se incluyen en la comunicación de la ciencia, se encuentran la comunicación entre pares, la divulgación, la difusión y el periodismo científico. Algunos también incluyen la enseñanza informal de la ciencia. En relación a lo anterior, una característica que hay que puntualizar es que el público involucrado en la comunicación de la ciencia es un público voluntario, que es lo que permite distinguirlo de la enseñanza formal de la ciencia, la cual es generada en las escuelas.

Según Ana María Sánchez Mora (2002, p. 306), la divulgación de la ciencia, como parte de dicha comunicación, se refiere a “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”.

Dentro de la comunicación de la ciencia, en particular de la física cuántica, se presenta la problemática de que muchas veces los conceptos de la teoría emigran fuera del contexto, menciona Fayard, ocasionando alteraciones en el significado. En el caso de los científicos que

se dedican a las tareas de divulgación “algunos respetuosos, a veces hasta el exceso, del significado y de las referencias exactas de los conceptos, experimentan las más grandes dificultades para situarse en un punto de vista distinto al de su disciplina. Cuando no toman en cuenta el punto de vista del no especialista, ni lo aceptan ni lo respetan, y saturan sus discursos de una terminología que desanima al más motivado” (Fayard, 2004, p. 27).

Tomando en cuenta la anterior declaración, se sustraerán ciertos textos divulgativos de la física cuántica escritos por los especialistas y se observará cómo es el lenguaje utilizado, identificando qué tanto se despegan del lenguaje especializado para mostrar las problemáticas filosóficas implícitas en la cuántica.

a. Antecedentes de la divulgación de la física

Para definir los comienzos de la divulgación de la física es necesario en primera instancia hacer una revisión de aquellos trabajos considerados antecedentes de la divulgación de la ciencia. Sin embargo, es difícil establecer una fecha exacta para esta etapa. A pesar de ello, algunos historiadores, entre ellos Beltrán Marí (1997), han considerado como el primer antecedente de divulgación de la ciencia el texto “Diálogo sobre los principales sistemas del mundo” de Galileo en 1632 (Cazaux, 2010); de ser así, éste también representaría el primer texto en la divulgación de la física. El “Diálogo de Galileo” está escrito a manera de conversación, en el que participan los personajes de Salviati, Simplicio y Sagredo, quienes nos introducen en la discusión sobre las visiones del universo, la ptolemaica y la copernicana.

De acuerdo a Jack Meadows, el comienzo se localiza a finales del siglo XVII a causa del surgimiento de la obra de Newton “Philosophiae Naturalis Principia Matemática”, cuando el enfoque cuantitativo de la obra se hizo incomprensible para el público culto de la época (Cazaux, 2010, p. 16) y muchos científicos se preocuparon por hacer público su trabajo. Por su parte, Pierre Fayard indica que la primera empresa de la comunicación de la ciencia o de “Public Communication of Science and Technology” como él la identifica, fue la publicación de la “Enciclopedia” en el siglo XVIII (editada entre los años 1751 y 1772 por Denis Diderot y Jean Le Rond d’Alambert) en la cual se recopilaban los conocimientos y se ponían al alcance de los lectores utilizando el lenguaje entonces llamado vulgar, el francés.

En el siglo XIX, cuando se comenzó a percibir una especialización de ciertas disciplinas, la divulgación de la ciencia tendría otro objetivo distinto al público no especializado. Ahora los

textos se dirigirían a otros científicos que no pertenecieran a la disciplina, de esta manera la divulgación se convierte en una actividad específica con el objetivo de informar o dar a conocer ciertas temáticas. Quizá sea en este contexto, en el de la especialización de disciplinas, donde los textos de divulgación en física sean localizables.

Por mencionar algunos de los autores que se han dedicado a crear textos de divulgación en física encontramos a Carl Sagan, George Gamow, Paul Davies, John Gribbin, Fred Hoyle, Stephen Hawking, Roger Penrose, Hubert Reeves, entre otros. Todos ellos comparten la característica de ser físicos de formación, diferenciándose por su propio estilo de escritura.

Con la física cuántica, “se generaron interpretaciones de los propios físicos [que buscaban aclarar]¹ sus posturas particulares en artículos y libros, aunque sus explicaciones no siempre fueran accesibles a un público en general” (Sánchez, 2011, p. 26). Varios científicos se dedicaron a realizar trabajos en el sentido de divulgación sobre la nueva física.

Considerando lo anterior, y rastreando las obras de divulgación que surgieron con esta temática, se puede observar que los años de publicación están a la par del desarrollo de esta ciencia, identificando así los comienzos de la divulgación de la física cuántica.

En este escrito se considerarán algunas de las publicaciones que han tenido como propósito exponer la física cuántica a un público que no está familiarizado con el tema, por ello consideradas publicaciones divulgativas. Los autores de las publicaciones aquí presentadas son los propios físicos que se han preocupado por mostrar a la sociedad interesada las características fundamentales de la teoría cuántica. Serán pues, estos mismos textos, los que se retomarán a través de todo el trabajo de investigación.

Es importante advertir que los mencionados aquí solamente son una pequeña muestra de una amplia lista de textos y autores que se han ocupado en prescindir del lenguaje especializado para difundir temáticas científicas, en particular la física cuántica.

Respecto a esto, John Gribbin (1986, p. VIII) menciona que fue a finales de los setenta y principios de los ochenta cuando fueron apareciendo trabajos con intenciones de introducir al público no especializado en el mundo cuántico. Sin embargo, anterior a estos años, entre 1939 y 1967, se pueden localizar los textos del físico y astrónomo ucraniano, George Gamow (1905-1968), esto es, su serie de libros del señor Tompkins (personaje) dirigidos a un público no especializado.

¹ A través del escrito, lo que aparece entre corchetes es mío.

Gamow en un primer momento trabajó en territorio ruso, sin embargo, debido a la opresión en Rusia huyó a los Estados Unidos, obteniendo la nacionalización en 1940. El trabajo de Gamow no sólo se centra en la elaboración de textos divulgativos, sino que también se reconoce por haber pertenecido a prestigiosas academias científicas, por sus trabajos en física atómica y nuclear, sin dejar de lado que sus teorías contribuyeron de manera significativa al proceso del conocimiento y reconocimiento del DNA y a la consolidación de las teorías del Big Bang.

En lo que respecta a su obra de divulgación, la más conocida es *El país de las maravillas*. En los cuentos compilados en esta obra se retoma la teoría de la relatividad, la teoría cuántica y los avances de la física que se presentaron en esa época, donde el objetivo que Gamow menciona es “ayudar al lector a formar con claridad el trasfondo del mundo físico que nos rodea” (1997, p. 6). Es importante señalar que las primeras ediciones de los cuentos que Gamow publicó han sufrido modificaciones en el argumento e ilustraciones, debido a los cambios que se han percibido en el desarrollo de la física.

Por otro lado, John Gribbin (1946-) es un astrofísico inglés que se ha destacado por sus publicaciones en el periodismo científico, así como por una variedad de libros de contenido científico dedicados a un público no especializado. A través de su texto titulado *En busca del gato del Schrödinger* (1986) nos presenta la historia de la mecánica cuántica. Es reconocido como uno de los mejores textos dedicados a divulgar estudios sobre la física (Macfarlane, 2002). Al presentar la historia de la física cuántica implícitamente indica las cuestiones filosóficas de las interpretaciones que se le han dado a la teoría; entre ellas el autor distingue la interpretación de Copenhague y la versión de los “muchos mundos” (Gribbin, 1986, p. 227).

Otro físico reconocido que se dedicó al trabajo divulgativo en la física fue Richard Feynman (1928-1988) a través de sus conferencias y libros. *Seis piezas fáciles* (1995) es una selección de capítulos del libro *Lecciones de física* (1963), siendo esta última una de sus publicaciones más reconocidas. El físico Paul Davies menciona en el prólogo que los capítulos de ese texto “son presentados en términos cualitativos para introducir al público no especializado a temas específicos en física”. No obstante, es importante destacar que *Lecciones de física* surgió a partir de un curso impartido por Feynman a principios de los años sesenta, dirigido a los estudiantes de primero y segundo año del California Institute of Technology (Caltech). Ante tal circunstancia, el público no podría considerarse general, pero tampoco especializado; esto no

excluye que se considere divulgativo por la forma en que están expresadas las ideas. Feynman reduce ideas profundas a términos sencillos y comprensibles, por lo que retomar *Seis piezas fáciles*, editado bajo una colección divulgativa, representa un texto que conmemora a *Lecciones de física*. En éste se encuentran secciones dedicadas a la mecánica cuántica, mismas que se retomarán para su exposición en el presente trabajo.

Otro de los textos de Feynman clasificado como divulgativo es *El carácter de la ley física* (1965), con siete capítulos que corresponden a conferencias dadas en la Universidad de Cornell en el año de 1964 registradas por la BBC. Aquí se encuentra un capítulo en el que presenta una de las características más representativas de la física cuántica, el fenómeno de interferencia, el cual se expondrá más adelante.

Por otro lado, Robert Gilmore (1941-), con formación académica en física y profesor en la Universidad de Drexel, publicó el libro *Alicia en el país de los cuantos* (2006), en el que intenta exponer de una forma clara los rasgos esenciales de la mecánica cuántica a través de la narración alegórica, es decir, a través de una historia de ficción basada en la famosa novela *Alicia en el país de las maravillas*.

De los textos mencionados anteriormente se pueden distinguir dos estilos de textos divulgativos. Por una parte, están los que se basan en recursos literarios para expresar el contenido científico (*El nuevo breviario del señor Tompkins*, *Alicia en el país de los cuantos*, y en gran parte *En busca del gato de Schrödinger*), y por otra están los discursos a manera de ensayo o conferencias (los textos de Richard Feynman), elaborados con lenguaje no especializado con el propósito de generar entendimiento en una mayor población, sin restringirse al círculo de especialistas.

b. Objetivos de la divulgación de la física cuántica

El objetivo de la divulgación de la física cuántica, así como de la ciencia en general, se desprende de la necesidad de mostrar a la población interesada un conocimiento específico.

Muchos de los textos dedicados a la divulgación de la física cuántica se justifican a partir de las consecuencias tecnológicas que se han logrado con el desarrollo de esta ciencia. Dicha justificación viene acompañada con el propósito de mostrar cómo muchas veces la tecnología se relaciona con la vida cotidiana de la sociedad. Esto se manifiesta, por ejemplo, con el caso del transistor y el láser, así como el desarrollo del sistema de posicionamiento global (GPS),

una de las tecnologías que en la actualidad ha tenido gran impacto en la sociedad.²

Sin embargo, es importante destacar que hacer mención de las tecnologías no podría ser una buena justificación para la divulgación, ya que los propios desarrollos tecnológicos en algunas ocasiones han sido utilizados en contra de la humanidad, tal es el caso del desarrollo de armamento nuclear, como menciona el físico teórico Clemente de la Torre en su texto *Física cuántica para filósofos* (2000, p. 11).

Distinto a lo anterior, otro de los objetivos que se busca al difundir conceptos generales de la física cuántica a un público no especializado es contrarrestar los mitos que se han generado alrededor de esta teoría, ideas que en algunas ocasiones tienen el propósito de vender artilugios con propiedades esotéricas o de explicar fenómenos extraños (Cirac, 2012), propiciando una confusión conceptual entre las nociones presentes en la teoría y aquello que se muestra como un argumento científico para intentar avalar lo que se presenta a la sociedad y que en realidad forma parte de la condición pseudocientífica.

De acuerdo a Clemente de la Torre, los objetivos para divulgar la física cuántica relacionados con evidenciar el vínculo de la ciencia con el desarrollo tecnológico son calificados como superficiales. Esto se debe a que el objetivo primordial para divulgar la física cuántica podría ser mostrar que el surgimiento de esta ciencia representó una revolución científica que implicó una nueva forma de percibir la realidad en la escala microscópica, distinta a la que se presentaba con la física clásica, siendo esta última la que nos proporciona descripciones del comportamiento de la naturaleza más apegadas a la intuición.

Por otra parte, otro de los objetivos de presentar el conocimiento de la física se remonta a una idea más básica, en términos de Reichenbach (1996, p. 19), “para satisfacer a la voluntad de conocer como una necesidad esencial del ser humano”. 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 con la sociedad. No por ello se demeritan las aportaciones tecnológicas que la física ha desarrollado, que muchas veces han sido para

² Para precisar uno de estos ejemplos, el GPS fue desarrollado a partir de la creación de relojes atómicos, estos relojes están instalados en cada uno de los satélites que componen el “sistema de posicionamiento global”. En un principio, los relojes atómicos fueron diseñados para estudiar la naturaleza del tiempo en sí mismo, y en particular, el efecto de la gravedad sobre el tiempo que Einstein había predicho en su teoría de la gravedad. Los relojes atómicos están basados en las leyes de la física cuántica, que indican que los átomos emiten o absorben energía electromagnética. Cuando un átomo sufre una transición de un “estado de energía” a otro más bajo, emite una onda electromagnética con una frecuencia de resonancia, siendo esta frecuencia idéntica en todos los átomos de un tipo determinado, y su precisión es la que se utiliza para crear un reloj de máxima exactitud.

satisfacer las necesidades humanas.

c. Descripción general de los textos a analizar

- *El nuevo breviario del Señor Tompkins*³ de George Gamow

Surgió a partir de los cuentos que se recopilaron en el libro *El país de las maravillas*. Los cuentos que componen este último fueron escritos con el propósito de explicar a los interesados por la temática las ideas fundamentales de la física moderna. Estos cuentos en un principio fueron publicados en la revista científica popular *Discovery* y posteriormente recopilados por Cambridge University Press en 1940.

En los cuentos que conforman *El país de las maravillas* se presenta al señor Tompkins como un empleado de banco que a través de sus sueños reflexiona sobre varias nociones fundamentales de la física, como espacio, gravitación, materia, energía, etc. A manera de apéndice se incluyen algunas conferencias a las que el señor Tompkins asistió, y fueron éstas las que propiciaron los sueños del personaje y permitieron que se percatara de los temas relevantes en la física. Con la ayuda de dos personajes, el señor Tompkins y el profesor, la historia nos remite a otra realidad en la que es posible percatarnos de los fenómenos cuánticos.

Al pequeño libro de *El país de las maravillas* se le hace una actualización que queda a cargo del físico británico Russell Stannard (1931-), dedicado a la divulgación de la ciencia e interesado por la relación entre ciencia y religión. Las modificaciones que se le hicieron a los cuentos fueron en argumentos e ilustraciones que Gamow había diseñado. Esta nueva edición quedó bajo el nombre de *El nuevo breviario del señor Tompkins*, compuesta por trece cuentos. De ellos, aquí se retomaran dos, en los cuales se hace referencia a la física cuántica: “Snooker cuántico” y “El safari cuántico”.

En el primero de ellos se presenta la conferencia del profesor de física a la que el señor Tompkins asiste. En la exposición, el profesor plantea cómo fue el desarrollo de la teoría cuántica y la define como aquella que “se ocupa de las interacciones recíprocas y los movimientos de los objetos materiales que tienen lugar en el espacio y en el tiempo”

³ Primera publicación en 1999 en inglés bajo el título de *The new world of Mr. Tompkins*, publicada por Cambridge University Press.

(Gamow, 2009, p. 131). Durante la exposición, el señor Tompkins se queda dormido y sueña que se encuentra en un bar acompañado del profesor, observando un juego de *snooker*.⁴ En este juego se muestra la peculiaridad de que las bolas se comportan como objetos cuánticos, presentando así efectos cuánticos. Mientras ambos miran, el profesor interviene con comentarios para explicarle lo que sucede con el comportamiento de las bolas. En esta explicación él hace referencia a nociones como ondas de probabilidad, a las interpretaciones y al indeterminismo de la física cuántica, mostrando mayor énfasis en la relación de incertidumbre propuesta por Heisenberg.

En el cuento “El safari cuántico” se describe otro sueño del señor Tompkins. En este sueño, él y el profesor viajan al safari para conocer la selva cuántica. Ahí, observan una analogía del experimento de la doble rendija para dar cuenta del principio de interferencia como característica de los objetos cuánticos.

Dentro de las narraciones que Gamow presenta, también hace alusión a otras características de la teoría cuántica, todas ellas de una manera sintetizada. Esto se observará a lo largo del presente trabajo. Es importante señalar que si la exposición de Gamow se extendiera mostrando más detalles, la narrativa ya no pertenecería a la clasificación de relatos, por lo que precisar las ideas implicaría que el texto entrara en otra clasificación.

- *En busca del gato de Schrödinger*⁵ de John Gribbin

Este texto fue escrito a partir del interés del autor por la física cuántica y con el propósito de hacer frente a aquellos textos que relacionaban a la mecánica cuántica con fenómenos pseudocientíficos (Gribbin, 1986, p. XI).

La definición que Gribbin aporta sobre mecánica cuántica es dada con las siguientes palabras: “Rama de la ciencia puede resultar una expresión incorrecta, ya que la mecánica cuántica proporciona el soporte fundamental de toda la ciencia moderna. Sus ecuaciones describen el comportamiento de objetos minúsculos, del tamaño del átomo o incluso menos, y proporcionan la única explicación del mundo de lo muy pequeño” (Gribbin, 1986, p. XIII). La pregunta que inspira a Gribbin para elaborar este texto es: ¿qué es la realidad? A partir de ésta, el autor expone cronológicamente a lo largo de tres secciones los sucesos que

⁴ Una variante del juego de billar.

⁵ Primera publicación en 1984 en inglés bajo el título *In Search of Schrödinger's Cat*, publicada por Bantam Books.

propiciaron el desarrollo de la física cuántica, para de esta manera poder describir lo que se considera como “realidad cuántica”.

Dentro del texto, se observa una narrativa en donde los personajes involucrados son los propios físicos que intervinieron a través de sus investigaciones en el proceso de gestación de la física cuántica. Además de aportar explicaciones y descripciones, Gribbin introduce anécdotas y en algunas ocasiones se pueden identificar opiniones personales del propio autor; esto se referirá en algunos fragmentos.

- *Alicia en el país de los cuantos. Una alegoría de la física cuántica*⁶ de Robert Gilmore

Haciendo alusión a la novela de Lewis Carroll, *Alicia en el país de las maravillas*, Robert Gilmore desarrolla una trama en la cual narra la aventura de una joven llamada Alicia, quien se adentra en el mundo de las partículas elementales. El texto es una alegoría de la física cuántica, en el sentido expresado en el diccionario: “ficción en virtud de la cual una cosa representa o simboliza otra distinta”, menciona Gilmore en su prólogo (p. 9). A través de la narración describe las características esenciales que se presentan en la física cuántica. Sin embargo, a lo largo del texto nunca proporciona una definición explícita de lo que es la física cuántica.

El texto diseñado como narrativa es escaso de ecuaciones, solamente muestra una que representa la relación de Heisenberg. La lectura está acompañada por imágenes y notas al final de cada sección en las que se explica de forma resumida las nociones relevantes para la física cuántica. En estas notas se evita el lenguaje narrativo y literario, recurriendo a uno un poco más especializado.

El objetivo del autor es hacer notar a los lectores la importancia de la cuántica en la vida cotidiana, así como mostrar los éxitos que la teoría ha tenido en la descripción del mundo de las partículas.

- *Seis piezas fáciles. La física explicada por un genio*⁷ de Richard Feynman

Se trata de una recopilación de seis capítulos del libro del mismo autor *Lecciones de física*.

⁶ Primera publicación en 1994 en inglés bajo el título *Alice in Quantumland: an allegory on Quantum Physics*, publicado por Springer.

⁷ Primera publicación en 1994 en inglés con el título *Six Easy Pieces. Essential of Physics Explained by Its Most Brilliant Teacher*, publicado por Springer.

Para comprender cómo surgió *Seis piezas fáciles* es necesario tener en cuenta el origen de *Lecciones de física*, y para ello nos remontamos al lanzamiento del Sputnik en 1957 por parte de la Unión Soviética. Después de este evento, en Estados Unidos se comenzó una revisión de la forma en que se enseñaba y apoyaba a la ciencia en ese país y, entre otras iniciativas, se creó una comisión nacional para mejorar la enseñanza de la física en el primer ciclo en las universidades (Navarro, 2011, p. 199).

A partir de ello, Matthew Sands, profesor del Caltech y amigo de Feynman criticaba que en dicho instituto se mantenía el mismo programa de enseñanza elaborado veinte años antes. Para modificar estos programas, se solicitó apoyo a Feynman y se le propuso impartir el curso a los de primer año. Así, esto se llevó a cabo en 1961 y 1962, cubriendo los temas de mecánica clásica, relatividad especial, termodinámica y óptica, además de cálculo numérico y mecánica cuántica.

El curso que Feynman impartió fue reconocido ampliamente por estudiantes y profesores, pues se caracterizaba por ser informal y recurrir al humor. Fue por la novedad de estas clases, que se decidió grabarlas, y a partir de las grabaciones se elaboraron notas como material de trabajo y posteriormente se decidió que esas notas se convirtieran en libro. En palabras de Sands, Feynman “no sólo estaba preocupado por el contenido de cada clase, sino que además cada una tenía que ser autocontenida, completa en sí misma. Tenía que ser como una obra teatral, que tiene su línea argumental, con introducción, desarrollo y desenlace” (Navarro, 2011, p. 201).

La habilidad de Feynman se reflejó al describir algunas nociones de la física sin necesidad de utilizar lenguaje técnico, empleando analogías o ilustraciones de la vida cotidiana para transmitir los rasgos esenciales de dichas nociones. Se menciona que la técnica de Feynman para exponer los principios de la física se basaba en pensar “por qué los estudiantes quisieran aprender el tema y qué se quiere que sepan, [de esta manera] el método surgirá más o menos por sentido común” (Feynman, 2007, p. 21). Es por esto que el libro *Seis piezas fáciles* está considerado dentro de la divulgación de la ciencia.

Las lectura que se tomará de *Seis piezas fáciles* se titula “Comportamiento cuántico”. Según el propio Feynman, dentro de esta lección se “trató de describir los principios de la mecánica cuántica de una forma que no requiriese una formación previa en las matemáticas” (2007, p. 28).

En esta presentación, Feynman da la definición de mecánica cuántica a sus alumnos, y a la vez a los lectores, de la siguiente manera:

... es la descripción del comportamiento de la materia en todos sus detalles y, en particular, de lo que sucede a escala atómica. Las cosas a una escala muy pequeña no se comportan como nada de lo que ustedes tengan experiencia directa. No se comportan como ondas, no se comportan como partículas, no se comportan como nubes, o como bolas de billar, o como pesos colgados de muelles, o como nada que ustedes hayan visto alguna vez. (Seis piezas fáciles. La física explicada por un genio. , 2007, pág. 150).

- *El carácter de la ley física*⁸ de Richard Feynman

Una de las actividades que Feynman realizó fueron las charlas dirigidas al público no especializado, dedicadas a la divulgación de la física y de la ciencia en general (Navarro, 2011, p. 105). Entre ellas se encuentran las conferencias impartidas en la Universidad de Cornell en 1964 registradas por la BBC; a partir de esas conferencias se editó el libro *El carácter de la ley física* considerado como divulgativo.

En dicho texto se observa que Feynman plantea cuestiones generales, por ejemplo, qué es una ley física o por qué son importantes las simetrías de las leyes físicas. En uno de los siete capítulos se presenta una de las características más representativas de la física cuántica, la dualidad onda-partícula a través del experimento de la doble rendija. Este capítulo se titula “Probabilidad e incertidumbre. La visión de la naturaleza a través de la mecánica cuántica” y será retomado en el desarrollo del presente trabajo. En él, Feynman expresa que se trata de la conferencia más difícil, por tratar ideas abstractas y alejadas de la experiencia cotidiana.

⁸ Primera publicación en 1965 en inglés bajo el título *The Character of Physical Law*, publicado por BBC.

2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA TEORÍA CUÁNTICA EN LOS TEXTOS DIVULGATIVOS

En este apartado se hará una exposición de cómo fue el contexto en el que se generó la teoría cuántica. Se tomarán en cuenta los problemas teóricos y experimentales que propiciaron el inicio de nuevas formas de estudiar a la naturaleza, particularmente en dimensiones muy pequeñas. En este sentido, se hará una breve presentación de lo que consistió el problema de la radiación del cuerpo negro, también conocido como la catástrofe ultravioleta. Enseguida, se presentará la solución que aportó Planck y posteriormente las aportaciones hechas por Einstein y Bohr, quienes utilizaron la solución dada por Planck para explicar el efecto fotoeléctrico y proponer un modelo atómico, respectivamente.

Muchas veces en los textos de divulgación se hace alusión al contexto, por lo que en esta sección será pertinente mostrar la forma en que los autores seleccionados desarrollan y exponen los acontecimientos que preceden a lo que se conoce como física cuántica.

Los libros que tendremos en cuenta dentro de esta sección son *En busca del gato de Schrödinger* de John Gribbin y los cuentos compilados en *El nuevo breviario del señor Tompkins* de George Gamow. También consideraremos la conferencia de Feynman “Probabilidad e incertidumbre. La visión de la naturaleza a través de la mecánica cuántica”, en la que se estudia el efecto fotoeléctrico.

La exposición de los sucesos e investigaciones previas a la física cuántica se presentará de manera breve al comienzo de cada sección. Posteriormente se citarán algunos fragmentos pertenecientes a los textos de divulgación con comentarios relacionados a ellos.

a. Problema de la radiación del cuerpo negro (o catástrofe ultravioleta)

A finales del siglo XIX, la mayoría de los fenómenos físicos se explicaban a través de la teoría de James Clerk Maxwell, conocida como teoría electromagnética, o por medio de la mecánica

newtoniana. Con la teoría propuesta por Maxwell, se daba cuenta de los fenómenos eléctricos y magnéticos basados en un modelo ondulatorio, mientras que con la mecánica de Newton se analizaba el comportamiento de la materia, basándose en un modelo corpuscular. Ambas teorías conformaron la física clásica.

En la década de 1880, el interés de los físicos se centró en la radiación emitida por un cuerpo caliente. Se sabía que la cantidad de radiación emitida está directamente relacionada con la temperatura del cuerpo: a mayor temperatura mayor radiación.⁹ Además, la intensidad de la radiación es perceptible según el color que presenta la materia.¹⁰

Con las teorías que se tenían en aquella época, basadas en un modelo de continuidad, donde el intercambio de energía entre el objeto caliente y la radiación que emite se daba de manera ininterrumpida, se preveía que la radiación o distribución de la energía de los cuerpos debía aumentar indefinidamente cuando la longitud de onda disminuyera, es decir, cuando hubiera un aumento de temperatura. Esto es, si se tenía un cuerpo al cual se le suministrara calor, el cuerpo iría aumentando de temperatura y a su vez radiaría una cantidad de energía infinita. Sin embargo, en los experimentos se observaba que la cantidad de energía emitida a longitudes de onda cada vez más cortas llegaba a cierto nivel y después disminuía; esto es, ningún cuerpo podía llegar a emitir una energía infinita. La antigua creencia, además de no ser observada experimentalmente, se trata de una conclusión que por sí sola es inverosímil.

La temática de la repartición de la energía en el espectro electromagnético ya había sido estudiada por el alemán Wilhelm Wien y el inglés Lord Rayleigh. La fórmula de Wien, propuesta en 1896, describía correctamente la radiación emitida en ondas cortas, rayos ultravioletas, mientras que la de Rayleigh describía bien la emisión de ondas largas, rayos infrarrojos (Papp, 1968, p. 55). Con la ley de Rayleigh se llegaba a la conclusión de que la energía debe ser infinita en cada temperatura, lo que claramente representa inconsistencia, además, en la experiencia se demostraba imposible. A esta inconsistencia e incompatibilidad entre teoría y experimentación se le conoció como catástrofe ultravioleta.

Ahora bien, de lo anterior se puede tener en cuenta el problema de la radiación del cuerpo negro. Éste jugó un papel importante para la formación de la mecánica cuántica. Un cuerpo

⁹ En 1859, Gustav Kirchhoff dedujo que la distribución de radiación está en función de la temperatura.

¹⁰ A bajas temperaturas la radiación emitida no es perceptible por el ojo humano, debido a que esa radiación se sitúa en el infrarrojo. Asimismo, a grandes temperaturas tampoco es perceptible por estar en la zona ultravioleta del espectro electromagnético.

negro puede ser considerado como un caso límite, en donde un objeto es capaz de absorber toda la radiación electromagnética que cae sobre él y también emitir su radiación interna, logrando producir radiación de todas las longitudes de onda, es decir de todo el espectro electromagnético.

La pregunta a la que Max Planck se enfrentó, derivada del enigma abierto de las fórmulas propuestas por Wien y Rayleigh, fue: ¿cómo predecir los datos experimentales, esto es, prever la cantidad de energía para cada longitud de onda y cada temperatura?

Esta problemática es presentada en algunos de los textos de divulgación seleccionados, en los que se expone de distintas formas y se le otorgan valoraciones distintas. Al considerar los textos de divulgación que presentan una estructura narrativa, como el de George Gamow en el cuento de “Snooker cuántico” y *En busca del gato de Schrödinger* de John Gribbin, se observan variaciones en la forma en que se presenta la información.

Gamow hace una breve mención del tema aludiendo a Max Planck, quien fue uno de los físicos que se interesó en la problemática y le dio solución. En el texto se menciona: “En el año 1900, el físico alemán Max Planck reflexionaba sobre las condiciones de equilibrio entre materia y radiación” (Gamow, 2009, p. 132). Este enunciado es expresado por el profesor de física que imparte una conferencia de física cuántica. Al haber mencionado lo anterior, no se dan más detalles de las implicaciones que conlleva la relación materia y radiación; tampoco hace referencia a lo que se conoce como catástrofe ultravioleta.

Por otra parte, con John Gribbin en *En busca del gato de Schrödinger* se advierte mayor contenido sobre el tema. Gribbin describe la relación entre el aumento de temperatura de un objeto y su emisión de energía para introducir el problema de la radiación de los cuerpos negros o catástrofe ultravioleta.

La forma más sencilla de entender cómo interaccionan materia y radiación consiste en observar un objeto caliente, ya que éste irradia energía electromagnética, y cuanto más caliente está, más energía irradia [...] Así, un atizador “al rojo” está más frío que uno “al blanco”, y un atizador que esté demasiado frío para irradiar luz visible puede estar caliente e irradiar radiación infrarroja de baja frecuencia. Incluso a finales del siglo XIX se tenía en cuenta que esta radiación electromagnética debía estar asociada con el movimiento de cargas eléctricas diminutas. Gracias al descubrimiento del electrón como parte integrante del átomo se puede observar cómo éste puede producir por vibración un haz de ondas electromagnéticas, de forma no demasiado distinta a como se pueden producir olas en la bañera con un movimiento de vaivén del dedo. Sin embargo, la mecánica estadística y el electromagnetismo postulaban una forma de radiación muy diferente de la realmente

emitida por los objetos calientes (Gribbin, 1986, p. 28).

Antes de introducir esta explicación, el autor desarrolló una descripción de las teorías que daban cuenta de los fenómenos en que los elementos son objetos materiales y de aquellos fenómenos de tipo ondulatorio. Para comenzar su explicación, introduce el ejemplo del atizador o asador, señalando que de acuerdo al color emitido por este objeto se percibirá su temperatura y tipo de radiación; esto lo explica sin necesidad de precisar detalles de las características del espectro electromagnético. Es decir, sin introducir términos especializados.

Tanto en las narraciones de Gamow como en Gribbin se puede encontrar la referencia a la relación entre materia y radiación. Sin embargo, Gamow no desarrolla la idea. Con Gribbin además de describir la relación materia-radiación a través del ejemplo, hace referencia al comportamiento y generación de ondas electromagnéticas de los electrones, estableciendo los prolegómenos para una explicación del comportamiento de dichas partículas.

Posterior al anterior fragmento citado, Gribbin asigna un apartado para hablar de la problemática dada a partir de la discrepancia entre la teoría y la evidencia empírica con respecto a la emisión de energía de los objetos, además de describir cómo puede ser entendido un cuerpo negro. Dentro de la sección “La pista del cuerpo negro” menciona:

Para realizar las predicciones [de la emisión de energía infinita], los teóricos utilizaron un ejemplo ideal imaginario, en este caso se trataba de un “perfecto” absorbente o emisor de radiación. Un objeto de estas características se llama usualmente un “cuerpo negro”, porque absorbe toda la radiación que le llega [...] Es fácil construir un “cuerpo negro” en el laboratorio; basta tomar una esfera hueca, o un tubo con los extremos cerrados, y practicar un pequeño hueco en su superficie. Cualquier radiación, como la luz, que penetre por el agujero quedará atrapada en el interior, rebotando en las paredes hasta ser absorbida; es muy improbable que pueda salir a través del hueco debido a ese rebote, por lo que este agujero es un “cuerpo negro” [...] Es interesante observar qué le sucede a un “cuerpo negro” cuando se calienta. El espectro de la radiación emitida -la cantidad radiada de cada longitud de onda- se puede estudiar en el laboratorio observando la que proviene de un recipiente caliente, y ello demuestra que depende únicamente de la temperatura del “cuerpo negro”. Existe muy poca radiación de longitud de onda muy larga, correspondiendo la mayor parte de la energía radiada a bandas de frecuencias intermedias. El máximo del espectro se desplaza hacia longitudes de ondas más cortas conforme el cuerpo se va calentando (del infrarrojo, al rojo, al azul, al ultravioleta), pero siempre aparece un corte para longitudes de onda muy cortas. Aquí es donde las medidas de la radiación del “cuerpo negro” efectuadas en el siglo XIX entraban en conflicto con la teoría (Gribbin, 1986, p. 28).

Después de lo anterior, continúa precisando la incompatibilidad entre la teoría y lo observado en los experimentos para determinar lo que se consideró como catástrofe ultravioleta:

Por extraño que parezca, las predicciones de la teoría clásica aseguraban que una cavidad llena de radiación siempre posee una cantidad infinita de energía [...] en lugar de un máximo en el espectro y de una caída a cero a longitud de onda nula. Los cálculos se basaban en el supuesto de que las ondas electromagnéticas de la radiación de la cavidad deberían tener las mismas características que las ondas en una cuerda, de violín por ejemplo, y que allí podían aparecer ondas de cualquier tamaño (es decir, de cualquier longitud de onda y de cualquier frecuencia) [...] De modo que la radiación de un “cuerpo negro” debería producir enormes cantidades de energía de alta frecuencia en una zona de ultravioleta. A más frecuencia, más energía. Esta predicción se conoce con el nombre de “catástrofe ultravioleta” (Gribbin, 1986, p. 30).

Al considerar los fragmentos anteriores, se puede observar que sí hay una consideración por describir cómo se llegó a la problemática de la catástrofe ultravioleta en la física, situación que marcó la pauta para el desarrollo de la física cuántica. Además, se observa que a pesar de introducir términos un tanto especializados, éstos van acompañados de una explicación para clarificar los aspectos correspondientes a las ondas en la radiación.

Solución de Planck

Cuando Planck comenzó a estudiar el problema, la teoría vigente suponía que la energía emitida por un objeto en relación a su temperatura provenía de los cambios de energía de las partículas en el interior de la materia, y que la distribución de la energía debía tener una tendencia hacia el infinito cuando la frecuencia de la radiación aumentara.

La aportación de Planck fue encontrar una ecuación empírica en donde se unificaban las fórmulas de Rayleigh y Wien, utilizando la constante de Planck (h). Gamow lo expresa así:

Al final [Planck] llegó a una conclusión sorprendente: a diferencia de lo que siempre había supuesto, ningún equilibrio de ese tipo es posible si la interacción entre la materia y la radiación se realiza en forma continua [...] Propuso que en realidad la energía era transferida entre la materia y la radiación en una

secuencia de “choques” separados. Una cantidad particular de energía era transferida en cada uno de esos actos elementales de interacción. Para conseguir el equilibrio deseado y no contradecir a los hechos experimentales, era necesario introducir una relación matemática sencilla según la cual la cantidad de energía transferida en cada choque era proporcional a la frecuencia de la radiación que dio lugar a dicha transferencia de energía.

Así, refiriéndose al coeficiente de proporcionalidad por medio del símbolo “ h ”, Planck tuvo que aceptar que la porción mínima o *quantum* de energía transferida podía calcularse con la expresión $E = hf$, donde f representa la frecuencia de la radiación. La constante h tiene el valor numérico 6.6×10^{-34} joules por segundo y se conoce de ordinario como la *constante de Planck*. [...] Observen que el valor de la constante de Planck es muy pequeño y ésta es la razón por la cual los fenómenos cuánticos no son observados de ordinario en nuestra vida diaria (Gamow, 2009, p. 133).

Es en el anterior pasaje donde Gamow describe, en voz del profesor de física, cómo fue que Planck llegó a la solución correcta para conocer la cantidad de energía emitida para todo el espectro electromagnético, mencionando la necesidad de introducir una relación matemática, siendo así como alude a la constante de Planck. Sin embargo, no señala las implicaciones que tuvo para la física la introducción de dicha constante de manera directa. El tipo de lenguaje que se percibe en la cita anterior es característico del personaje científico que da la conferencia, según se percibe en el relato. A pesar de que en la narración se advierte que dicha conferencia está destinada a todo público, en donde se incluyen los lectores, la comprensión del contenido puede no ser favorable.

Por otra parte, en el texto de John Gribbin se hace alusión a la aportación de Planck de la siguiente manera:

El problema atrajo la atención de un buen número de físicos durante la última década del siglo XIX. Uno de ellos fue Max Planck, [...] y su gran preocupación por esa época consistía en resolver la “catástrofe ultravioleta” por aplicación de reglas termodinámicas. [...] Desde 1895 hasta 1900, Planck se ocupó del problema y publicó varios artículos claves que establecieron la conexión existente entre la termodinámica y el electromagnetismo, pero no consiguió resolver el enigma del espectro del “cuerpo negro”. En 1900 cambió radicalmente su teoría, [...] como un acto de desesperación en el que se mezclaron el azar, la intuición y un afortunado error en las matemáticas utilizadas. [...] Planck se dio cuenta de que las dos descripciones del espectro del “cuerpo negro” podían combinarse en una fórmula matemática simple que proporcionaba la forma completa de la curva y para ello utilizó la Ley de Wien y la Ley de Rayleigh-Jeans. Esta fórmula constituyó un gran éxito, ya que la ecuación de Planck concordaba perfectamente con las observaciones de la radiación emitida por la cavidad, aunque carecía de soporte físico. Wien y

Rayleigh -también Planck en los cuatro años anteriores- habían tratado de construir una teoría partiendo de hipótesis físicas plausibles que condujera a la curva del espectro del “cuerpo negro”. Y sin embargo, fue Planck el que descubrió la curva correcta sin que nadie supiera los supuestos físicos implicados en la obtención de dicha curva.

La fórmula de Planck fue hecha pública [...] en octubre de 1900; durante los dos meses siguientes, Planck estuvo inmerso en el problema de encontrar una base física para su ley [...] muchos intentos fracasaron, hasta que finalmente sólo quedaba una alternativa, molesta para Planck, que implicaba la división de la energía en porciones y el tratamiento de cada una de éstas como magnitudes reales que podían ser descritas por leyes de tipo probabilístico [...] Planck se vio obligado a explicar el significado de dichas porciones de energía electromagnética en porciones individuales como una manifestación de que los osciladores eléctricos del interior del átomo sólo podían emitir o absorber energía en “paquetes” de un cierto tamaño, recibiendo cada uno el nombre de “cuanto” (Gribbin, 1986, pp. 31-33).

Posterior a esto, Gribbin procede a introducir la ecuación en donde Planck incluye la constante h .

En lugar de dividir el total de energía disponible en un infinito número de partes, sólo podía ser dividida en un número finito de porciones, cada una de ellas asociada a un oscilador, y la energía de dicha porción de radiación (E) debía estar relacionada con la frecuencia correspondiente (designada por la letra griega nu, ν) de acuerdo a una nueva fórmula, $E = h\nu$ donde h es una nueva constante, conocida como la *constante de Planck* (Gribbin, 1986, pp. 31-33).

Observando las descripciones dadas por Gamow y Gribbin, se encuentra en ambos la referencia a la aportación de Planck; en estilos diferentes, cada uno resalta aspectos similares de las implicaciones de la introducción de la constante de Planck (h) en la solución, principalmente la aparición de la discontinuidad. Gamow hace hincapié en la necesidad de una cantidad de energía definida para conseguir el equilibrio entre materia y energía (discontinuidad). Al mencionar que este valor definido fue dado por la constante de Planck, apunta que ésta representó la cantidad límite de energía que permitiría dar cuenta de los hechos experimentales. También expone la función de la constante de Planck dentro de la fórmula, sin dar más explicaciones de la ecuación.

Por su parte, Gribbin describe cómo fue el proceso en el que Planck llegó a concebir la ecuación que permitiría dar cuenta de la irradiación de energía por cada temperatura dada. Se

hace énfasis en lo fortuito que resultó la introducción de la constante de Planck y la necesidad de justificar teóricamente su uso. Asimismo, él también muestra que a partir de la inclusión de dicha constante se derivó la característica de discontinuidad en la energía. Posterior a ello, similar a Gamow, presenta la ecuación sin dar explicaciones exhaustivas.

De esta manera, podemos señalar que la importancia filosófica que tuvo la aportación de Planck radica precisamente en la discontinuidad que la constante implicó. Ésta significó la aparición de la barrera entre la física clásica y la nueva física que surgiría tras los estudios de esta magnitud, al aceptar la discontinuidad, negando la posibilidad del determinismo clásico y señalando el indeterminismo en la descripción de la naturaleza.¹¹

b. Einstein y el efecto fotoeléctrico

Einstein fue el primero en tomar en serio las implicaciones físicas del trabajo de Planck y tratarlas como algo más que un truco matemático. A finales del siglo XIX se esperaba que el efecto fotoeléctrico, al igual que la catástrofe ultravioleta, fuera solucionado a partir de las teorías clásicas de Newton y Maxwell. Sin embargo, no sucedió así, fue necesario plantear otro tipo de teoría con nuevos elementos, como la constante de Planck, para dar cuenta de esos fenómenos.

El efecto fotoeléctrico consiste en la transmisión de energía de los fotones a los electrones, esta situación se observa cuando incide radiación sobre alguna placa metálica, en donde los electrones de la placa salen disparados a causa del choque que tuvieron con los fotones de la radiación. La problemática radicaba también, al igual que en la radiación del cuerpo negro, en cómo explicar la relación de materia y radiación, ya que cada uno de estos objetos era explicado por distintas teorías de la física clásica.

Después de la introducción de la constante de Planck, en 1905 Einstein envió un artículo a la revista *Annalen der Physik* con el título “Un punto de vista heurístico sobre la producción y transformación de luz”. En este artículo, él propuso una teoría para explicar el efecto

¹¹ En el racionalismo clásico se afirmaba una continuidad en las conexiones causales de la naturaleza, que se ve negada por la aportación de Planck. Así mismo, en lo que respecta al indeterminismo, este va en contra del determinismo mecánico presente en la física clásica que en última instancia está relacionado con la creencia teológica de aceptar a dios en la naturaleza.

fotoeléctrico¹² apoyándose de la constante de Planck (h), en el cual planteó que la luz no se trata de una onda continua, sino que está formada por cuantos, los que posteriormente fueron llamados fotones por Gilbert N. Lewis.

Con la aportación de Einstein se observó que la luz presentaba discontinuidad. Esta imagen contradecía la idea de que la luz se trataba de un fenómeno ondulatorio. Basado en este planteamiento, años antes Fresnel había explicado la interferencia de la luz y la capacidad de los rayos de luz para atravesarse uno a otro sin deformarse. Con la idea de la luz como fenómeno corpuscular, la pregunta sería: ¿cómo es que los corpúsculos de luz pueden crear interferencia? De este modo se percibía el conflicto entre onda y corpúsculo.

Ahora bien, en “Snooker cuántico”, se vuelve recurrir a las explicaciones dadas por el profesor de física, para introducir la aportación de Einstein:

Un avance posterior sobre las ideas de Planck fue obra de Einstein. Él concluyó que no sólo la radiación es emitida como “paquetes de energía”, sino que esos paquetes transfieren después energía a la materia en la misma forma localizada que se observa en las partículas. En otras palabras, cada paquete se mantiene intacto: su energía no se dispersa en una región amplia como se suponía con anterioridad. A esos paquetes de energía los llaman “cuantos de luz” o *fotones* (Gamow, 2009, p. 134).

En este fragmento se puede observar que Gamow, a través de la expresión “paquetes de energía” implícitamente refiere al comportamiento corpuscular de la energía o luz. Sin embargo, no hace explícito que la aportación de Einstein se derivó de la búsqueda de dar explicación a lo que se conoce como efecto fotoeléctrico, además de haber considerado otros ejemplos.

En el texto de John Gribbin se muestran más detalles al respecto. Antes de hablar sobre el trabajo de Einstein, Gribbin menciona cómo fue que este científico se interesó por el tema del efecto fotoeléctrico y derivado de ese interés publica su artículo en “Annalen der Physik”. Posteriormente describe así el trabajo de Einstein:

Lo que Einstein hizo fue aplicar la ecuación $E=hf$ a la radiación electromagnética, en lugar de a los un tanto oscuros osciladores interiores de los átomos. Afirmó que la luz no es una onda continua, como los científicos habían creído durante

¹² El efecto fotoeléctrico consiste en que ciertos materiales, al ser expuestos a la luz, emiten electrones: el fenómeno fue observado y reportado por Hertz durante sus experimentos para producir ondas electromagnéticas.

cien años, sino que está integrada por paquetes bien definidos o cuantos. Toda la luz de una determinada frecuencia ν , que quiere decir un color particular, consiste en agregados de la misma energía E . Cada vez que uno de estos cuantos de luz golpea a un electrón le proporciona la misma cantidad de energía y, por tanto, la misma velocidad. Mayor intensidad de luz significa simplemente que hay más cuantos de luz (fotones) de la misma energía; sin embargo, si hay cambio de color de la luz, la frecuencia varía y, por ello, se altera la energía transportada para cada fotón.

[...] Einstein amplió sus ideas cuánticas sobre la radiación en los años que siguieron hasta 1911, estableciendo que la estructura cuántica de la luz es una consecuencia inevitable de la ecuación de Planck y señalando ante una comunidad científica poco receptiva que la mejor forma de entender la luz podría consistir en una fusión de las teorías ondulatoria y corpuscular que habían competido entre sí desde el siglo diecisiete (Gribbin, 1986, p. 40).

La anterior exposición de Gribbin resulta un tanto confusa, ya que no clarifica cómo es que afectan los cuantos de luz a los electrones; sólo menciona: “cada vez que uno de los cuantos de luz golpea a un electrón le proporciona la misma cantidad de energía” y deja de lado el hecho de que dicha cantidad de energía puede propiciar emisiones de electrones dependiendo del material al que se le lancen los rayos luminosos. Además, es importante mencionar que en el texto de Gribbin se alude a la necesidad de involucrar teorías ondulatorias y corpusculares para dar explicación sobre la luz. Esta idea representó un cambio conceptual en la física cuántica.

Por otra parte, Feynman, hace referencia a esta temática en su conferencia titulada “Probabilidad e incertidumbre. La visión de la naturaleza a través de la mecánica cuántica”. La forma en que lo refiere es la siguiente:

Al principio se pensó que la luz se comportaba de manera parecida a una lluvia de corpúsculos, como gotas de agua o balas de ametralladora. Las investigaciones posteriores dejaron claro que esto no era del todo cierto, puesto que la luz se comportaba en realidad como las ondulaciones del agua y otras ondas. Posteriormente, ya en el siglo XX, tras nuevas investigaciones, se rehabilitó la idea de que, en muchos aspectos, la luz se comportaba como un haz de partículas. El efecto fotoeléctrico permitía incluso contar esas partículas, que hoy llamamos fotones. Cuando se descubrieron por primera vez, los electrones parecían comportarse como partículas o balas. Investigaciones posteriores, como los experimentos de difracción de electrones, demostraron que también se comportaban como ondas. A medida que pasaba el tiempo iba creciendo la confusión en torno al comportamiento de todas estas cosas: que si partículas, que si ondas... Todo parecía indicar que se comportaban de las dos maneras (Feynman, 2005, p. 142).

Como preámbulo de este tema Feynman habla de la historia de la luz para ejemplificar el

hecho de que en la ciencia, al estudiar los fenómenos naturales, es necesario que la “imaginación científica” se incremente para dar cuenta de aquello que no se puede percibir a simple vista. Más adelante, en el capítulo tercero, se abordará con más detalle las explicaciones que Feynman da en su obra.

Es importante mencionar que Feynman no refiere a Einstein y su relación con el efecto fotoeléctrico, menos aún al papel que tuvo la constante de Planck para determinar que el comportamiento de la luz fuera a través de corpúsculos. Sin embargo, logra introducir la problemática del comportamiento dual del fenómeno de la luz. Después de abordar la problemática, Feynman se centra en el papel que jugó la mecánica cuántica en su resolución. No obstante lo anterior, hay que resaltar que la propuesta de Einstein tuvo que esperar varios años para ser corroborada experimentalmente.

Efecto Compton

Tras la propuesta de Einstein, en 1916 Robert A. Millikan (1868 – 1953) probó la validez de la formulación dada por Einstein, midiendo la energía de los electrones expulsados y demostrando que dicha energía es proporcional a la frecuencia de los fotones del rayo incidente. Asimismo, confirmó el valor numérico de la constante h expuesta por Planck (Papp, 1968, p. 75). De esta manera, la representación corpuscular de la luz se hacía presente a la par que su representación ondulatoria, sin embargo, las dudas de la naturaleza dual de la luz prevalecían entre los físicos, por lo que la búsqueda continuaba con el propósito de comprobar la existencia de los fotones.

En 1926 Arthur Compton (1892-1962) realizó un experimento que demostró el carácter corpuscular del campo electromagnético, es decir, él tuvo una demostración de la naturaleza corpuscular de la luz después de los trabajos presentados por Planck y Einstein. Planck había demostrado que la luz sale de la fuente en corpúsculos; con el experimento de Compton se puso en manifiesto que la luz llega también en corpúsculos.

Explicado a grandes rasgos, el experimento consistió en emitir desde una fuente de radiación un haz de rayos X con cierta longitud de onda; cierto rayo se hacía pasar a través de una lámina que lo dispersaba a otra dirección. Lo que se obtuvo fue que la radiación dispersada presentaba otra longitud de onda, mayor a la de los rayos incidentes, implicando

así que los fotones de la radiación al chocar con los electrones de la lámina perdían impulso y su frecuencia disminuía.¹³ De esta manera, el experimento sugería que en la radiación electromagnética estaban presentes corpúsculos (Selleri, 1986, p. 89).

Para dar cuenta de los resultados obtenidos en los experimentos de Compton fue necesario ofrecer una explicación que considerará la luz como una serie de corpúsculos y no como un fenómeno ondulatorio. De esta manera probó la dualidad onda-corpúsculo de la luz. Compton escribió:

La teoría actual se basa, esencialmente, en el supuesto de que cada electrón efectivo en la dispersión, dispersa un cuanto completo. Esto implica, también, la hipótesis de que los cuanta de radiación inciden según direcciones definidas y se dispersan en direcciones definidas. El soporte experimental de la teoría indica, de manera muy convincente, que un cuanto de radiación lleva consigo momento, así como energía (Selleri, 1986, p. 89).

Dicho lo anterior, se procederá a mostrar cómo es planteado el efecto Compton en los textos divulgativos de Gamow y Gribbin, quienes son los que hacen mención de ello. Por su parte, George Gamow, en “Snooker cuántico”, hace referencia al experimento realizado por Compton de la siguiente manera:

Una de las pruebas experimentales más convincentes de la veracidad del concepto de los cuantos de luz y de la energía y el momento asociados a ellos, fue fruto de la investigación del físico estadounidense Arthur Compton. Al estudiar las interacciones de la luz y los electrones, él obtuvo como resultado que los electrones puestos en movimiento por la acción de un rayo de luz se comportan exactamente como si hubieran sido golpeados por una partícula dotada de la energía y el momento cuyos valores se expresan en las ecuaciones 13 [$E = hf$] y 14 [$p = hf/c = h/\lambda$]. Se observó también que los fotones mismos, después de chocar con los electrones, sufrían ciertos cambios (en sus frecuencias) que coincidieron en forma notable con las predicciones de la teoría. Así podemos decir que, en lo que se refiere a las interacciones con la materia, la propiedad cuántica de la radiación electromagnética, como la luz, es un hecho experimental bien establecido (Gamow, 2009b, p. 135).

Por otra parte, en la exposición de Gribbin se ofrece mayor información de corte histórico, como ya se ha observado en las secciones anteriores. Esto permite dar cuenta de los trabajos realizados por Compton de una manera más amplia.

¹³ La longitud de onda (λ) se trata de la distancia que hay entre un pulso y otro pulso. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia (f), una longitud de onda larga corresponde a una frecuencia baja, y una longitud de onda corta representaría una frecuencia alta. La frecuencia se trata del número de veces en un tiempo determinado que sucede un fenómeno, en este caso serían las repeticiones de las ondas.

A pesar de que en 1917 Einstein ya estaba convencido de la realidad de lo que hoy se llaman fotones, hubieron de transcurrir otros seis años antes de que el físico americano Arthur Compton obtuviera una prueba experimental [...] de la realidad de los fotones [...] A través de una serie de experimentos en los comienzos de los años 20s había llegado a la conclusión de que la interacción entre rayos X y electrones sólo podía explicarse si los rayos X se trataban, en cierta medida, como partículas; es decir, como fotones. Los experimentos clave se basaban en la forma en que la radiación X es dispersada por un electrón; o, en lenguaje de partículas, a la forma en que interaccionan un fotón y un electrón cuando ambos colisionan. Cuando un fotón de los rayos X choca contra un electrón, éste gana energía y momento y se desplaza en un cierto ángulo; en cambio, el fotón pierde energía y momento y sufre una desviación [...] La colisión es similar al impacto de una bola de billar sobre otra en reposo, y la transferencia de energía y momento ocurre de la misma forma. En el caso del fotón, sin embargo, la pérdida de energía significa un cambio en la frecuencia de la radiación, dado por la cantidad $h\nu$ transmitida al electrón. Se necesitan las teorías corpuscular y ondulatoria para conseguir una explicación completa del experimento. Cuando Compton llevó a cabo sus análisis, comprobó que la interacción se comportaba exactamente de acuerdo con las reglas anteriores: los ángulos de dispersión, los cambios de longitud de onda y el retroceso del electrón se ajustaban perfectamente a la idea de que la radiación X está constituida por partículas de energía $h\nu$. Este proceso hoy se conoce como “efecto Compton”, y en 1927 Compton recibió el Premio Nobel por dicho trabajo. Después de 1923, la realidad de los fotones como partículas que transportaban energía y momento quedó definitivamente establecida [...] Sin embargo, era evidente la naturaleza ondulatoria de la luz. Como Einstein afirmó en 1924, “resultaban entonces dos teorías de la luz, ambas indispensables... sin ninguna relación lógica” (Gribbin, 1986, p. 70).

Teniendo las anteriores exposiciones, nos podemos dar cuenta de que ambos manifiestan la importancia que tuvo el experimento de Compton para determinar el comportamiento dual de las radiaciones, las cuales están compuestas por fotones, idea establecida años atrás por Einstein. Mientras Gamow presenta de una manera somera las reacciones que se dan cuando un electrón es golpeado por un fotón, consecuencias que denotan en efecto la propiedad corpuscular de la radiación, Gribbin hace uso de la metáfora de la bola de billar impactando a otra bola de billar en reposo para representar la colisión entre fotones y electrones. Además, nos presenta una exposición más amplia de las implicaciones que tuvo el efecto Compton para la comprensión de la naturaleza dual de la luz.

Otra particularidad que se puede notar en la forma en que estos dos autores expresan la misma situación es que en el caso de Gamow se recurre a formulaciones matemáticas como parte de la argumentación dada al público. Sin embargo, estas formulaciones no tienen una presencia muy significativa en la exposición de Gribbin, pues éste hace un mayor uso de metáforas y sus explicaciones son más detalladas que las exposiciones concretas dadas por Gamow. En este sentido, es importante hacer énfasis en que los tipos de textos de estos dos

autores son distintos; por un lado, los relatos de Gamow en unas cuantas páginas recopilan características significativas de la física cuántica. Por otro lado, tenemos la exposición extendida de Gribbin, quien se beneficia de la libertad que se le puede dar a la extensión al tener el libro completo para tratar un tema en específico.

c. Modelo atómico de Bohr

Otro de los ámbitos en donde se hizo presente el “cuanto de acción”, también llamado constante de Planck (h), fue en la descripción del átomo que hizo el físico danés Niels Bohr (1885-1962).

Para comprender lo que Bohr proponía, es necesario remitirnos a la propuesta atómica de Ernest Rutherford (1871–1937), cuando en 1910 proyectó partículas alfa sobre una hoja de oro para investigar la composición de la materia. De acuerdo al modelo atómico de Thompson,¹⁴ modelo que en ese momento predominaba, se esperaba que las partículas alfa atravesaran la hoja de metal sin ninguna dificultad. Sin embargo, se observó que unas pocas partículas alfa al atravesar el metal sufrían una desviación y muchas de ellas eran reflejadas. A partir de esos resultados, Rutherford propuso otro modelo atómico con semejanza al sistema solar, indicando que la masa y la carga positiva se concentraban en un núcleo y alrededor de éste orbitaban electrones con carga negativa.

Sin embargo, la representación hecha por Rutherford presentaba un problema en su planteamiento. Al considerar la carga eléctrica de los electrones, que se desplazaban alrededor del núcleo con un movimiento acelerado, emitiendo radiación y perdiendo energía, en un momento dado estos electrones colapsarían en el núcleo. No obstante, se vio que este colapso no se presenta en la realidad.

Atraído por esta problemática, Bohr trabajó sobre el modelo de Rutherford para conciliar lo propuesto en la teoría y lo que se presentaba realmente en el comportamiento del átomo. Para ello introdujo el tema de la discontinuidad en el átomo. Bohr postula que el radio de cada órbita circular no puede variar de manera continua, sino que por el contrario hay que

¹⁴ El modelo atómico de Thompson consistía en considerar al átomo como una esfera de carga positiva en la que se incrustaban electrones de carga negativa. En gran parte de la literatura este modelo se representó como un pastel con pasas, siendo las pasas del relleno los electrones incrustados.

atribuirle valores determinados en los que interviene la constante de Planck (Ortoli, S. y Pharabod, J., 2001, p. 32).

Sobre el modelo atómico de Bohr, George Gamow, enseguida de haber tratado el alcance que tuvo el experimento de Compton, menciona la aportación que hizo Bohr para la introducción de nociones cuánticas en la descripción del átomo. Esto lo expresa de la siguiente manera:

El físico danés Niels Bohr aportó un refinamiento posterior de las ideas cuánticas. En 1913, él fue el primero en expresar que *el movimiento interno de cualquier sistema mecánico sólo puede poseer un conjunto discreto de valores energéticos posibles*. En consecuencia, esto significa que el movimiento interno sólo puede cambiar su estado en pasos finitos, puesto que tal transición va acompañada de la radiación o la absorción de una cantidad discreta de energía (es decir, la diferencia de energía entre los dos estados energéticos permitidos). Esta idea fue sugerida por la observación de que, cuando los electrones atómicos emiten radiación, el espectro resultante no es continuo sino que está formado sólo por ciertas frecuencias: es un “espectro lineal”. En otras palabras, de acuerdo con la ecuación 13 [$E = hf$], la radiación emitida tiene ciertos valores energéticos. Esto es comprensible si la hipótesis de Bohr sobre los estados energéticos permisibles en el emisor es correcta; en este caso, se trata de los estados energéticos de los electrones en el átomo (Gamow, 2009b, p. 135).

Con respecto a la cita anterior, podemos observar que la relevancia de la aportación de Bohr se manifiesta, a grandes rasgos, en introducir la idea de energía discreta en el movimiento de los electrones de una órbita a otra, idea contraria a la de considerar la energía como un continuo. Asimismo, se introduce la noción de “estados energéticos”, que se esclarece brevemente a través de la radiación o absorción de energía por parte de los electrones. Lo anterior nuevamente es expuesto en palabras del profesor de física dentro de una conferencia, por lo que el lenguaje utilizado se considera especializado.

Por su parte, John Gribbin dedica toda una sección del libro a la aportación de Bohr y su descripción atómica. El apartado se titula “El átomo de Bohr”; aquí solamente se mostrarán fragmentos de su explicación para observar cómo es su argumento expositivo e identificar la relevancia que le da Gribbin a Bohr.

Bohr estaba interesado en ensamblar ideas diferentes para construir un "modelo" imaginario que proporcionará, al menos aproximadamente, resultados acordes con las observaciones de átomos reales [...] Partió de la imagen del átomo como un sistema solar en miniatura, con los electrones moviéndose en órbitas acordes con las leyes de la mecánica clásica y del electromagnetismo; afirmó que los electrones no podían abandonar dichas órbitas como consecuencia de la emisión de radiación, porque sólo podían emitir porciones discretas -

cuantos completos - de energía y no la radiación continua que postulaba la teoría clásica. Las órbitas estables de los electrones correspondían a ciertas cantidades fijas de energía, múltiplos del cuanto elemental, pero no existían órbitas intermedias porque requerían energías fraccionarias. Todo el concepto de órbita de Bohr se basa en la física clásica; en cambio, la idea de los estados electrónicos correspondientes a cantidades fijas de energía -niveles de energía, como se les llamaría después- proviene de la teoría cuántica. Un modelo atómico en el que se mezclan elementos clásicos y cuánticos no podía proporcionar un conocimiento exacto del mundo atómico, pero proporcionó a Bohr un modelo eficaz para progresar en esa línea. Su modelo resultó erróneo, pero inauguró una vía de transición hacia una teoría cuántica genuina del átomo y, como tal, prestó un valor incalculable. (Gribbin, 1986, p. 42).

En este fragmento Gribbin expresa, en cierto grado, la motivación que tuvo Bohr para adentrarse al estudio de la estructura atómica, esto es, intentar elaborar una teoría que correspondiera con lo observado. Para ello, se dice, retomó el modelo atómico de Rutherford, que se distinguía por su representación análoga al sistema solar; no obstante, es destacable que dentro del texto de Gribbin no se hace mención explícita de la propuesta que Rutherford había hecho años atrás.

Posteriormente podemos observar que Gribbin refiere, de manera general, las afirmaciones de Bohr en relación con el comportamiento de los electrones alrededor del núcleo atómico. Es en dichas afirmaciones donde Bohr introduce el carácter discontinuo o discreto en las órbitas, en las cuales se trasladan los electrones. En esta discontinuidad se vuelve a hacer presente el concepto del “cuanto de acción” propuesto por Planck.

Otra particularidad del texto de Gribbin es que dentro de su exposición no solamente se expresa la aportación de Bohr hacia la teoría cuántica, sino que también el autor hace ver que la contribución dada por Bohr no fue totalmente satisfactoria como modelo atómico. Sobre esto último, Gribbin hace énfasis en que a pesar de lo erróneo que resultó el modelo de Bohr, la imagen propuesta a semejanza del sistema solar es la que prevalece en textos de divulgación e incluso en textos didácticos, pues, según explica, es la que ha permitido la comprensión y visualización de aquello a lo que no tenemos acceso a simple vista.

La exposición de Gribbin sobre los argumentos dados por Bohr continúa de la siguiente manera:

Bohr afirmó que los electrones alrededor del núcleo de un átomo se mantenían en la misma órbita porque no podían radiar energía continuamente, sino que sólo podían emitir (o absorber) un cuanto completo de energía -un fotón- y pasar de un nivel de energía (una órbita según la idea antigua) a otro. Esta idea tan aparentemente simple supone realmente una profunda ruptura con las ideas clásicas. Es como si Marte desapareciera de su órbita y

reapareciera, instantáneamente, en la órbita de la Tierra, al tiempo que emitía en el espacio un pulso de energía (en este caso, de radiación gravitacional). Por lo tanto, nos damos cuenta de la inexactitud de la idea de un átomo como sistema solar para explicar los acontecimientos ordinarios, y de la ventaja de concebir a los electrones simplemente como si se presentaran en diferentes estados, correspondientes a diferentes niveles de energía, en el interior del átomo. Un salto de un estado a otro puede darse en cualquier dirección, hacia arriba o hacia abajo en la escala de energía. Si un átomo absorbe luz, el cuanto $h\nu$ se invierte en pasar el electrón a un nivel de energía superior (al peldaño siguiente de la escala); si el electrón vuelve al estado original ha de radiar exactamente la misma energía $h\nu$ (Gribbin, 1986, p. 46).

Como se puede ver, Gribbin vuelve a recurrir a la comparación con el sistema solar, ejemplificando el traslado de los electrones de una órbita a otra con los cambios de posición de órbita que se presentarían, en este caso, con los planetas del sistema solar; dichos cambios en los electrones representan la absorción o radiación de cantidades discretas de energía. En esta explicación a partir de la analogía con órbitas introduce la idea de niveles de energía y estados de los electrones, y es en los cambios de niveles de energía donde se asocia la cantidad discreta de los cuantos de energía, $h\nu$.

Trece años después de la decisión de Planck de incorporar el cuanto en la teoría de la luz, Bohr introdujo el cuanto en la teoría del átomo [...] En el átomo de Bohr se mezclaban ideas cuánticas junto a otras de la física clásica, sin otro criterio que el de que el modelo continuara funcionando [...] Se asignaron nuevas propiedades al átomo –números cuánticos– para adaptar el modelo a las observaciones experimentales, sin ninguna justificación teórica que explicara la necesidad de tales números cuánticos ni la razón de que algunas transiciones estuvieran prohibidas (Gribbin, 1986, p. 47).

Por último, Gribbin acentúa la falta de justificación teórica en la propuesta dada por Bohr, indicando que solamente cumplía con la función de dar cuenta de lo que se observaba en el comportamiento atómico.

3. RASGOS ESENCIALES DE LA FÍSICA CUÁNTICA A TRAVÉS DE LA DIVULGACIÓN

En la presente sección se considerarán algunos elementos esenciales de la teoría cuántica, temas que comúnmente se mencionan en los textos de divulgación y son expuestos con algunas variaciones sin perder la idea central. Será, pues, en estos temas donde se implican las problemáticas filosóficas que subyacen en la teoría.

La elección de los temas para la presente sección se hizo según su importancia en el desarrollo de la física cuántica. A partir del desarrollo del formalismo matemático, en un comienzo por Heisenberg y Schrödinger, se buscó dar una respuesta a cómo dicho formalismo podría dar cuenta de la realidad microscópica. A partir de esto, se implicaron problemáticas de corte filosófico que han sido temas de discusión para algunos físicos y filósofos. De las temáticas que han generado controversias se eligieron: *a)* el principio de incertidumbre o indeterminación de Heisenberg; *b)* el debate entre Bohr y Einstein, polémica de la que se deriva la interpretación de Conpenhague postulada por Bohr y otros físicos que lo apoyaban; también, de este debate surge por parte de Einstein el artículo reconocido de Einstein-Podolsky-Rosen (EPR); y por último *c)* la paradoja del gato de Schrödinger. Se pretende que en un futuro trabajo de investigación se consideren para su análisis otras características de la física cuántica que también han implicado cuestiones de enfoque filosófico.

El orden expositivo en esta sección será similar a las anteriores; en primera instancia se presentará como introducción el porqué de la elección de dicha temática y su relación con cuestionamientos filosóficos. Posteriormente se presentará cómo es que dichas temáticas son expuestas en los textos de divulgación.

a. Principio de Indeterminación o incertidumbre de Heisenberg

Antes de abordar las implicaciones filosóficas del principio de indeterminación o

incertidumbre de Heisenberg, se presentará una rápida revisión del concepto de determinismo, idea que se encontraba implícita en la concepción de la física clásica. Esto permitirá hacer un contraste y observar el impacto que representó dicha noción de indeterminismo, considerada parte de la física moderna.

Para comprender la idea de determinismo y su implicación en el desarrollo de las ciencias clásicas, en específico de la física, debemos tomar en cuenta que uno de los intereses del hombre a través de la historia ha sido la interpretación de los sucesos de la naturaleza para encontrar sus causas, y con ello en un momento dado predecir hechos. Es en este interés donde se pueden reconocer tácitamente elementos de la noción de determinismo, que a continuación estudiaremos de manera general.

En un primer momento, podemos considerar la siguiente cita del filósofo estadounidense William James (1842–1910), que de acuerdo a John Earman, filósofo de la ciencia, logra representar el determinismo del mundo clásico:

¿Qué es lo que el determinismo profesa? Éste profesa que todas aquellas partes del universo ya establecidas, nombrarán y ordenarán aquellas otras partes que serán [en un futuro]. El futuro no tiene posibilidades ambiguas ocultas en su seno: la parte que nosotros llamamos el presente es compatible con una sola totalidad [...] El todo está en cada y todas las partes, y se une con el resto en una unidad absoluta, [es] un bloque de hierro, en el que no puede haber una equivocación ni sombra de variación (James, 1884, p. 5).

La cita anterior es parte de un discurso dado en el año de 1884, sin embargo, William James se enfoca en el determinismo dentro de la problemática del libre albedrío, en una relación más directa con los pensamientos y acciones humanas. Para tratar el tema del determinismo en la ciencia nos remitiremos a la concepción dada por el filósofo francés Pierre Simon de Laplace (1749–1827) que versa 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).

Esta concepción que comparte Laplace es la más recurrente al describir el determinismo

dentro de la física clásica. De esta manera, se observa que a finales del siglo XIX se consideraba que el comportamiento del universo estaba determinado por leyes físicas estrictas; de ser así, el comportamiento de cualquier sistema físico y a su vez el comportamiento del universo en general sería comprendido a partir de dichas leyes y del estado actual del sistema. Con respecto a lo anterior, Alastair Rae (1998, p. 17) menciona que el principio determinista consiste en una consecuencia directa de la manera de pensar establecida por Newton.

Antes de pasar al otro tema, al indeterminismo, es importante señalar que en la historia de la filosofía la teoría opuesta al determinismo no se trata del indeterminismo, sino de algo conocido como “finalismo” (Gispert, 2004, p. 72), el cual indica que la conexión entre las cosas no existe según las causas, sino que se genera a partir del fin al que todas las cosas tienden. La teoría finalista, también llamada “teleología”, fue predominante en la escolástica aristotélica.¹⁵

El determinismo fue pugnado durante la Edad Media; se sospechaba que era una concepción atea, ya que el finalismo aristotélico aún prevalecía y a la vez estaba relacionado con la religión cristiana. Fue en la época moderna cuando el determinismo resurgió con la idea del mecanicismo de Descartes; él consideró que la realidad física es capaz de entenderse a partir de la “causalidad eficiente”,¹⁶ que, a diferencia de la concepción aristotélica, en ella no se hace referencia a algún fin o propósito. Es pues, a través del mecanicismo que la realidad se considera como independiente del observador, y es explicada a través de procesos que se rigen por leyes causales, por lo que están sujetas a un determinismo.

Como ejemplo de lo anterior Newton muestra en su tercer libro de *Principia Mathematica* que el mundo está regulado por leyes matemáticas inmutables, similar al proceder de una máquina. Debido a ello, a tal cosmovisión se le ha reconocido como “universo máquina” (Casini, 1971).

En el determinismo físico se contiene la expresión matemática de la causalidad, que era considerada como una sucesión temporal de los fenómenos físicos bajo un orden cualitativo. Se presuponía que se trataba de una particularidad que se encontraba presente en los fenómenos de la naturaleza, pues se consideraba que a través de las matemáticas los

¹⁵ Aristóteles señala la imposibilidad de aceptar que los fenómenos naturales recaigan en la casualidad, indicando que éstos suceden para una finalidad.

¹⁶ Causalidad que mediante su acción provoca necesariamente el efecto.

fenómenos naturales se convertían en algo visible y tangible para el entendimiento (Papp, 1968, p. 150). Considerando lo anterior, se hizo una distinción entre determinismo y causalidad.

Con la física cuántica se niega el determinismo; específicamente se podría afirmar que niega la concepción determinista dada por Laplace. Mientras que en la física clásica se puede presuponer la asignación de valores a todas las magnitudes físicas, en la física cuántica esta posibilidad no existe, ejemplo de ello es la imposibilidad de determinar simultáneamente la posición y momento¹⁷ de una partícula.

De acuerdo a la física cuántica, el principio de incertidumbre o indeterminación indica a grandes rasgos que: entre más preciso sea el valor de la posición de una partícula, más disminuye la precisión para el valor de su momento; sólo será posible conocer estos valores con cierta probabilidad. No obstante, el principio de indeterminación no sólo se restringe a estas dos variables, sino que es aplicable a ciertos pares de variables físicas conjugadas.

También es importante especificar que la noción de incertidumbre ha tenido distintos sentidos en la literatura de la física. Entre sus diferentes denotaciones se puede referir a la falta de conocimiento de una cantidad por un observador, o bien, a la inexactitud experimental con la que se mide alguna cantidad; asimismo, a una cierta ambigüedad en la definición de una cantidad, o a una dispersión estadística en un conjunto de sistemas (Hilgevoord y Uffink, 2012). De este modo, es importante señalar que el sentido del término “incertidumbre” puede variar a “indeterminación” de acuerdo al texto consultado. En algunas ocasiones, el concepto de incertidumbre está relacionado con el aspecto epistemológico, mientras que el de indeterminación se relaciona con el aspecto ontológico. No obstante, aquí retomaremos la noción de indeterminación para dar continuidad con la exposición dada sobre determinismo.

Fue el físico alemán Werner Heisenberg (1901–1976) quien en 1925 se dedicó a crear un formalismo matemático que diera cuenta de las magnitudes observables y de los fenómenos cuánticos, formulando así en 1927 el principio de incertidumbre, considerado uno de los

¹⁷ El momento es la magnitud física que mide la cantidad de movimiento de un cuerpo en cualquier teoría mecánica. En mecánica clásica la cantidad de movimiento es equivalente al producto de la masa por su velocidad en un instante determinado [$p=mv$]. Además, es importante señalar que en ocasiones para ejemplificar el principio de indeterminismo de Heisenberg se utilizan las variables de posición y velocidad, situación que se verá reflejada más adelante en algunos textos divulgativos. Al considerar la velocidad también se considera a la magnitud de momento.

aspectos más importantes de la física cuántica.

En 1925 su idea principal era que sólo las cantidades que pudieran ser observables debían jugar un papel en la teoría, evitando los intentos por formar imágenes de lo que sucede dentro del átomo. Dentro de la física atómica, los datos observacionales eran obtenidos de la espectroscopia y su asociación con las transiciones atómicas; de esta manera, Heisenberg consideró las “cantidades de transición” como elementos básicos de la teoría. Con el apoyo de su colega Max Born (1882-1979), quien se dio cuenta que las “cantidades de transición” obedecían a las reglas del cálculo matricial, desarrollaron la mecánica matricial de la teoría cuántica (Hilgevoord y Uffink, 2012). 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 conmutativas ($ab \neq ba$), esto quiere decir que de acuerdo al orden en el cual se realicen las mediciones, los resultados varían fundamentalmente. Esto es, que si primero se mide el momento, el resultado correspondiente a la posición no será el mismo a primero haber medido la posición y posteriormente el momento (Ortoli, S. y Pharabod, J., 2001, p. 43).

De la no conmutatividad de las matrices de Heisenberg se desprende el fundamento de su principio de indeterminación, debido a la imposibilidad de medir a la vez con precisión dos variables correspondientes al comportamiento de una partícula, por ejemplo, su posición y momento.

Fue en 1927 cuando Werner Heisenberg enunció este principio en su artículo titulado “The Physical Content of Quantum Kinematics and Mechanics”.¹⁸ En dicho principio se afirma que a una partícula no se le puede atribuir en un instante dado una posición y el momento. En cuanto más definida se encuentre la posición, menor es el conocimiento del momento, y viceversa. En palabras de Heisenberg, se expresa de la siguiente manera:

En el instante de tiempo en que se determina la posición, es decir, en el instante cuando el fotón es dispersado por el electrón, el electrón se somete a un cambio discontinuo en el impulso. Este cambio es mayor cuanto menor es la longitud de onda de luz empleada, es decir, es más exacta la determinación de la posición. En el instante en el cual la posición del electrón

¹⁸ El título original fue *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*, que parcialmente ha sido traducido como *On the Physical Content...* por Wheeler and Zurek (1983), mientras que en la biografía de Heisenberg realizada por Cassidy (1992) se tradujo como *On the Perceptible Content...*

es conocida, su momento sólo puede ser conocido hasta magnitudes que correspondan a ese cambio discontinuo; así, la posición estará más precisamente determinada, mientras que el conocimiento del momento tendrá menos precisión, y a la inversa (Heisenberg, 1927).

Fue el propio Heisenberg quien se percató de las implicaciones filosóficas al tomar en cuenta la ley de causalidad, basada en su formulación fuerte, con la afirmación de que “conocer exactamente lo que sucede en el presente permite calcular lo del futuro”. Heisenberg señaló que “no es la conclusión, sino la hipótesis la que es falsa”. Para él, dentro de la física cuántica, al no poder conocer los valores iniciales exactos se descarta la previsibilidad exacta de los acontecimientos futuros. “Dado que todos los experimentos obedecen las leyes cuánticas y, por consiguiente, a las relaciones de indeterminación, el fracaso de la ley de la causalidad es una consecuencia definitivamente establecida de la mecánica cuántica”, declaró Heisenberg (Jammer, 1974, p. 75).

A este principio se le ha considerado la expresión matemática que permite dar cuenta de la imprecisión en el conocimiento de las magnitudes dinámicas y cinemáticas.¹⁹ La siguiente fórmula es un ejemplo de lo que representa el principio de indeterminación que Heisenberg propuso.

$$\Delta p \cdot \Delta q \geq h^{20}$$

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 expresa un límite teórico, que es regulado por h , para conocer la posición y el momento simultáneamente.

La imposibilidad de medición se genera a causa del límite establecido por la constante de Planck, ya que ella representa una mínima cantidad que pertenece a la escala microscópica, por lo que cualquier intento de medición implicaría una perturbación. Dicha variación no se visualiza en medidas macroscópicas, pero en las escalas microscópicas la perturbación producida significa una variación importante. Respecto a lo anterior Bohr mencionaba:

¹⁹ Las magnitudes dinámicas son las que determinan las causas del movimiento, como la energía, impulso y la cantidad de movimiento. Por su parte, las magnitudes cinemáticas son las que determinan los cambios de posición de algún cuerpo, limitándose a la trayectoria en función del tiempo.

²⁰ Δ simboliza la indeterminación.

La descripción visual de las teorías de la física clásica representa una idealización válida únicamente para fenómenos en cuyo análisis todas las acciones implicadas son lo suficientemente grandes como para permitir despreciar el cuanto [...] al realizar experimentos con partículas atómicas nos encontramos con regularidades de un nuevo tipo, incompatibles con el análisis determinista (Bohr, 1970, p. 4).

El principio de indeterminación juega un papel importante en las implicaciones filosóficas de la física cuántica, tal es en el caso de los debates sobre la coherencia de la interpretación de Copenhague, apoyada por Heisenberg y Bohr, la cual se retomará en las siguientes secciones.

Dicho lo anterior, a continuación se expondrá cómo esta característica esencial de la física cuántica es expresada a través de los textos de divulgación. Se considerarán los escritos de George Gamow, John Gribbin, Richard Feynman y Robert Gilmore.

En lo que respecta a Gamow y a su cuento de “Snooker cuántico”, para introducir la idea de indeterminación o incertidumbre, como él la reconoce, comienza aludiendo al concepto de movimiento en la física clásica y su relación con el concepto de trayectoria. Después, relaciona este tipo de movimiento con el movimiento percibido en las partículas en una escala microscópica. Para ello, el autor a través del personaje del profesor de física invita al público a imaginar una situación en la que se busca detectar la trayectoria de alguna partícula. El ejemplo mental lo compone de la siguiente manera:

[...] 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. 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, 2009b, pp. 138-140).

Después de mostrar dicha situación imaginaria, 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. Continúa argumentando la imposibilidad de observar a partir de incrementar la longitud de onda utilizada en la luz, expresando lo siguiente:

[...] 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).

De acuerdo a lo citado, perteneciente al “Snooker cuántico”, se hace notar a grandes rasgos en qué consiste el principio de incertidumbre sin hacer mención del autor de dicho principio (Heisenberg). Alude a la distinción entre las mediciones que se realizan a partir de la física clásica y las que se realizan considerando objetos cuánticos. No obstante, no se percibe alusión directa a lo que esto significa en términos filosóficos.

En lo que respecta al texto de John Gribbin, él destina la sección “Azar e incertidumbre” para desarrollar el principio de incertidumbre y sus implicaciones. Al iniciar dicha sección Gribbin expresa:

El principio de incertidumbre de Heisenberg, que se ve hoy como el dato central de la teoría cuántica, no fue aceptado de forma inmediata por sus colegas [...] necesitó cerca de diez años para alcanzar esta elevada posición [...] La idea surgió tras la visita de Schrödinger a Copenhague en septiembre de 1926 [...] Heisenberg se dio cuenta de que una de las principales razones por las que Bohr y Schrödinger a veces parecían estar duramente enfrentados era un conflicto entre conceptos distintos. Ideas como posición y velocidad, no tienen el mismo significado en el mundo de la microfísica que en el mundo ordinario. Así que, ¿cuál es el significado? Y ¿cómo pueden relacionarse ambos mundos? Heisenberg volvió a la ecuación fundamental de la mecánica cuántica, $pq - qp = h/i$, y demostró, a partir de ella, que el producto de las incertidumbres en la posición (Δq) y en el momento (Δp) tiene

que ser siempre mayor que h . La misma regla sobre incertidumbres se aplica a cualquier par de lo que se llaman variable conjugadas [...] Los conceptos clásicos del mundo cotidiano también existen en el mundo atómico, afirmó Heisenberg, pero sólo pueden emplearse en la forma restringida que las relaciones de incertidumbre revelan. Cuanto con más precisión se conozca la posición de una partícula, tanto más imprecisamente conoceremos su momento, y viceversa (Gribbin J. , 1986, p. 136).

Como se ha visto anteriormente, el texto de Gribbin proporciona mayor cantidad de información histórica a través de su exposición. En este caso, al presentar el “principio de incertidumbre” hace notar las diferencias, entre las argumentaciones dadas por Bohr y Schrödinger respecto a la física cuántica, diferencias que Heisenberg percibe y que actúan como antecedentes para el “principio de incertidumbre” que posteriormente desarrolló y publicó en 1927.

Respecto a los significados que se le adjudicaron al principio de incertidumbre, Gribbin señala:

[...] Muchos experimentadores vieron en las conclusiones de Heisenberg un reto a sus habilidades. Creyeron que Heisenberg afirmaba que sus técnicas no eran lo suficientemente buenas como para medir simultáneamente la posición y el momento, y trataron de diseñar experimentos que le demostraran que estaba equivocado. Pero fue un intento inútil, ya que se basaban en algo que él no había dicho (Gribbin J. , 1986, p. 136).

Lo anterior, hace referencia a algunas explicaciones que se dan sobre el principio de incertidumbre, las cuales acentúan la incapacidad de los instrumentos de medida al tratar con objetos microscópicos, idea que Gribbin califica de errónea. Sin embargo, menciona que la noción fundamental que radica en el principio de incertidumbre no está relacionada con la incapacidad de los instrumentos, sino que es parte del comportamiento “natural” de los objetos microscópicos. Para aludir a la explicación que Heisenberg utilizó para dicho principio, Gribbin menciona cómo es que se comportarían los electrones al ser observados a través de la intervención de fotones:

[...] Heisenberg utilizó el ejemplo de la observación de un electrón para precisar su idea. Sólo se pueden ver las cosas mediante su observación, lo que implica el impacto de fotones de luz [...] Un fotón no altera mucho a un objeto [pero] un electrón es tan pequeño que se debe usar energía electromagnética de una longitud de onda corta para poder observarlo [...] la radiación gamma de este tipo es muy energética, y cualquier fotón de la radiación gamma que tras rebotar en un electrón pueda ser detectado por el dispositivo experimental habrá cambiado drásticamente la posición y el momento del electrón [...] Todo ello da una idea

general sobre la imposibilidad de medir, con absoluta precisión y simultáneamente, la posición y el momento de un electrón. Pero lo que el principio de incertidumbre plantea es que, de acuerdo a la ecuación fundamental de la mecánica cuántica, no existen cosas tales como un electrón poseyendo simultáneamente una posición precisa y un momento preciso (Gribbin J. , 1986, p. 137).

Asimismo, cita una frase del artículo de Heisenberg de 1927 que de acuerdo a Gribbin, representa el alejamiento con el determinismo, Heisenberg postuló: “no podemos conocer, por principio, el presente en todos sus detalles”, sobre ello Gribbin (1986, p. 137) menciona: “Aquí es donde la teoría cuántica se libera del determinismo de las ideas clásicas”.

Con el principio de incertidumbre, Gribbin muestra un preámbulo para hablar de la interpretación dada por Bohr posteriormente, conocida como la “Interpretación de Copenhague”. Entre líneas también hace mención de la preocupación por parte de los filósofos de las implicaciones que se contenían en las relaciones de incertidumbre. Sin embargo, no presenta quienes eran estos filósofos ni qué es lo que afirmaban. No obstante, de esta manera se manifiesta que dentro de la propuesta de Heisenberg se encontraban cuestiones filosóficas.

Continuando con las descripciones dadas en los textos de divulgación, pasaremos al texto de Richard Feynman referente a su lección titulada “Física básica” recopilada en “Seis piezas fáciles”. En este texto muestra el principio de incertidumbre de la siguiente manera:

La mecánica cuántica tiene muchos aspectos. En primer lugar, la idea de que una partícula tiene una posición definida y una velocidad definida ya no está permitida; es errónea. Para dar un ejemplo de lo errónea que es la física clásica existe una regla en la mecánica cuántica que dice que uno no puede saber a la vez dónde está algo y a qué velocidad se está moviendo. La incertidumbre del momento y la incertidumbre de la posición son complementarias, y el producto de las dos es constante. Podemos escribir la ley de esta forma: $\Delta x \Delta p \geq h/2\pi$ [...] Otro cambio muy interesante en las ideas y la filosofía de la ciencia que trajo la mecánica cuántica es este: no es posible predecir exactamente lo que va a suceder en cualquier circunstancia [...] No, no hay engranajes internos; la naturaleza, tal como la entendemos hoy, se comporta de tal modo que es fundamentalmente imposible hacer una predicción precisa de qué sucederá exactamente en un experimento dado. Esto es algo horrible; de hecho los filósofos habían dicho antes que uno de los requisitos fundamentales de la ciencia es que siempre que ustedes fijen las mismas condiciones debe suceder lo mismo. Esto sencillamente no es cierto, no es una condición esencial de la ciencia [...] los filósofos dicen muchas cosas acerca de lo que es absolutamente necesario para la ciencia, y siempre, hasta donde podemos ver, son bastante ingenuas y probablemente erróneas (Feynman, 2007, pp. 66-67).

Con lo anterior, es manifiesto el interés por mostrar brevemente en qué consiste el

principio de incertidumbre se da en función de expresar cómo este principio repercutió en las ideas establecidas en la filosofía de la ciencia, en específico en la filosofía de la física clásica basada en los resultados que en ella se obtenían. Asimismo, también se puede detectar de manera evidente el juicio de opinión o valoración por parte de Feynman sobre las opiniones de los filósofos, calificándolas como ingenuas. Además, se encuentra de manera implícita su conformidad con las ideas establecidas en la Interpretación de Copenhague (sobre estas ideas se abordará en las próximas secciones).

Por otro lado, en otra presentación de Feynman titulada “Comportamiento cuántico”, que también está recopilada en “Seis piezas fáciles”, se dedica un apartado para el principio de incertidumbre. Este apartado inicia de la siguiente manera:

Esta es la forma en que Heisenberg estableció originalmente el principio de incertidumbre: si ustedes hacen una medida en cualquier objeto, y pueden determinar la componente x de su momento con una incertidumbre Δp , entonces ustedes no pueden, al mismo tiempo, conocer su posición x con precisión mayor que $\Delta x = h/\Delta p$ [...] El principio de incertidumbre “protege” a la mecánica cuántica. Heisenberg reconoció que si fuera posible medir el momento y la posición simultáneamente con una precisión mayor, la mecánica cuántica se vendría abajo (Feynman, 2007, pp. 171).

En el apartado donde está introducido el anterior fragmento se despliega una descripción del experimento conocido como “el experimento de la doble rendija”. En dicho experimento se describe el fenómeno de interferencia a partir de partículas o balas, a partir de ondas, y a partir de electrones. Con dicho experimento se trata de demostrar la dualidad onda-corpúsculo como característica de la física cuántica.

Es pues, a partir de dicho experimento, en el sentido de querer observar el comportamiento de los electrones, que Feynman expone de manera general el principio de incertidumbre, por la imposibilidad de detectar con certeza el comportamiento de las partículas. Dicha imposibilidad se ocasiona por la perturbación en los electrones ocasionada por los fotones. Feynman menciona que los fotones entran en juego a través de la luz utilizada al intentar observar el comportamiento de estas partículas.

En la exposición dada por Feynman, a pesar de que se introduce en ciertas secciones lenguaje especializado, se logra comprender la idea básica del principio de incertidumbre, así como también, en algunos pasajes muestra la importancia filosófica de dicho razonamiento y al mismo tiempo insinúa que algunos filósofos pueden hacer comentarios erróneos debido a

la falta de rigor.

Ahora bien, considerando el texto de Robert Gilmore titulado “Alicia en el País de los cuantos”, se observa que a lo largo de la narración, son descritos ciertos pasajes que ilustran el “principio de incertidumbre”. El texto de Gilmore, al estar diseñado a manera de historia de ficción va presentando algunas concepciones de la física cuántica dentro de la trama de la historia.

En este sentido, para introducir al “principio de incertidumbre” en un primer momento de la historia, Gilmore describe a Alicia (el personaje principal) en un andén de ferrocarril. En dicho lugar, Alicia se encuentra acompañada por una multitud de electrones siempre en movimiento, debido a ello, Alicia no los puede percibir claramente. Es en este pasaje del cuento, donde Gilmore incluye un recuadro para hacer mención del principio de incertidumbre que se presenta en el comportamiento de los electrones. En el que se expresa lo siguiente:

El principio de incertidumbre de Heisenberg asegura que ninguna partícula puede tener valores simultáneos bien definidos de su posición y de su velocidad. Esto quiere decir que una partícula no puede estar quieta en una posición definida, puesto que una partícula inmóvil tiene una velocidad bien definida: cero (Gilmore, 2011, pág. 20).

Esta información se desprende de la narración de la historia, pero se distingue de ella por no ser parte del cuento. Es un tipo de estrategia utilizada por Gilmore, el de introducir “recuadros informativos” de acuerdo a la narración planteada durante el cuento. En estos recuadros, la información dada se podría considerar “técnica” en comparación con el lenguaje utilizado en la narración del cuento.

En otro pasaje del cuento, en donde Alicia se encuentra visitando un lugar llamado “El banco de Heisenberg”, la niña se vuelve a percatar del movimiento incesante de los electrones por lo que le seguía siendo imposible observarlos claramente. Un trabajador de este banco le informa que la causa de esta imposibilidad es dada por las “relaciones de incertidumbre que afectan a todas las partículas. Siempre parecen un poco indefinidas y nunca se les puede concretar con demasiada precisión” (Gilmore, 2011, p. 46).

En la forma de expresar las ideas en el escrito de Gilmore, esto es, a través de una historia relatada, el lenguaje técnico de la física cuántica no es muy perceptible. No obstante, a pesar de ello se logran expresar nociones generales y características de la teoría, produciendo por

medio de la trama un interés en el lector.

En lo que respecta a las cuestiones filosóficas que estas características implican, no se desarrollan explícitamente, pero lo que el autor consigue es una especie de desconcierto en el pensamiento que se va creando a través de las imágenes y representaciones que se nos van mostrando a través de la lectura, dichas representaciones se derivan de la imaginación y a la vez denotan ideas anti-intuitivas.

b. Debate entre Bohr y Einstein

El debate entre Bohr y Einstein se ha relacionado con la Quinta Conferencia de Física en el Instituto Solvay en Bruselas, realizada en 1927 del 24 al 29 de Octubre. El tema principal que versó en las presentaciones de este evento fue “Electrones y fotones”. En las presentaciones estuvieron: Bohr, Born, de Broglie, Dirac, Ehrenfest, Heisenberg, Pauli, Schrödinger, Einstein, entre otros. 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 Schrödinger²¹. Dicho formalismo fue bien aceptado debido a las predicciones que él arrojaba, sin embargo el significado implícito es lo que entraba en discusión. En cada una de las presentaciones, los participantes expusieron sus puntos de vista sobre la teoría cuántica. A partir de ellas, se puede decir que se fueron demarcando dos corrientes de pensamiento que habrían de concretarse al paso del tiempo.

Se suele decir, que estas dos corrientes se fueron perfilando en base a los desacuerdos dados entre Bohr y Einstein, cada uno de ellos con sus respectivos allegados. Estas oposiciones diferían por la manera de tratar con la “realidad”, es decir, tratar con una realidad objetiva que existe o no fuera de la observación. Lo que se discutía era, qué debía entenderse por “realidad” en los sistemas microfísicos.

Dentro de la filosofía de la ciencia se ha escrito mucho sobre la concepción de realidad, en específico, acerca de cómo es posible su conocimiento, es decir, se aborda desde una actitud

²¹ Heisenberg desarrolló en 1925 el formalismo de la física cuántica a partir de mecánica de matrices inconmutables, basado en las magnitudes observables o medibles. Es decir, en un sentido esto significa la imposibilidad de medir simultáneamente con precisión exacta a ambas matrices. Por los mismos años, precisamente en 1926, Schrödinger desarrollaba su formalismo de la función de onda (ψ), basada en una ecuación que da resultados deterministas de la evolución de los sistemas cuánticos en términos ondulatorios. Ambas son equivalentes matemáticamente.

epistémica, siendo el “realismo” una de las varias posturas que se tienen en la epistemología. Asimismo, es importante señalar que al abordar la cuestión por el conocimiento de la realidad, está implícitamente una posición ontológica que afirma la realidad existe independientemente del que conoce. Así pues, el concepto de realismo en la filosofía de la ciencia tiene distintas variantes de acuerdo a los autores que lo emplean. Sin embargo, no por eso es imposible encontrar una idea común que esté subyacente a ellas.

El realismo indica que la posibilidad del conocimiento de la naturaleza se da a partir de sus aspectos observables y no observables. Para determinar la distinción entre las propiedades observables y no observables, se hace alusión a las capacidades sensoriales del ser humano; las observables pueden ser percibidas directamente a través de los sentidos, mientras que las no observables son las que no se detectan directamente. Además, se señala que los objetos percibidos existen independientemente de ser observados. Otro punto a considerar, es que el realismo advierte que las teorías científicas son capaces de proporcionarnos conocimiento de la realidad. Lo anterior, son las características que se imponen en todas las concepciones del realismo, independientemente de las variaciones que cada autor designe (Chakravartty, 2011).

Recapitulando lo anterior, la noción de “realidad” estará en función de la concepción de observabilidad, que como se mencionó líneas atrás, está ligada con las capacidades sensoriales del ser humano. Respecto a esto y siguiendo a Shapere (1982) en este sentido se involucran también los instrumentos utilizados para observación.

Con el desarrollo de la cuántica, la asignación de “realidad” a ciertos estados y procesos se tornó problemática, los cuestionamientos se referían al significado que se le debería otorgar a la idea de realidad física, la localidad y el carácter completo o incompleto de las descripciones cuánticas (Ferrero, 1988, p. 22). Son en estos puntos, en donde las posturas de Einstein y Bohr diferían.

Las preguntas que se pueden considerar para distinguir a las dos grandes corrientes de pensamiento en la física cuántica siguiendo al filósofo de la física James T. Cushing (2003, p. 305) son: ¿Puede haber propiedades de las partículas (llamadas variables ocultas) que aún no han sido descubiertas, cuyos valores determinen el comportamiento futuro de estas partículas? ¿Puede que la indeterminación sea simplemente el resultado de la ignorancia de los valores de estas variables? En relación a estas preguntas, se han manifestado ideas

distintas desde ambas posturas.

Para quienes coinciden con las ideas propuestas por Bohr, se les reconoce como corriente ortodoxa o Interpretación de Copenhague. Para ellos, la física cuántica satisface uno de los criterios empíricos de las teorías científicas, el de conducir a predicciones; y en el caso de la cuántica se logran prever resultados en términos de probabilidades (Ortoli, S. y Parabod, J., 2001, p. 45). Por otra parte, para ellos la física cuántica propone una formulación de la “realidad” bajo una concepción indeterminista, en la que a partir de una función de onda²² se puede describir cualquier sistema cuántico.

En lo que respecta a Einstein, él se opuso a aquellos que tendían a aceptar tanto al indeterminismo como a la falta de realismo objetivo para compensar a la teoría, además desaprobó la no-localidad que implicaba la teoría. Él y algunos otros físicos estaban convencidos de una realidad física independientemente de cualquier observación. Para Einstein y quienes concordaban con su pensamiento, afirmaban que la física cuántica no se encontraba concluida, es decir, era incompleta. Además, Einstein señalaba que debería de haber algo que permitiera la representación o visualización intuitiva, tal como sucedía con la física clásica, en la que se permite de cierta manera visualizar el comportamiento de los objetos a nuestra escala.²³

En virtud de las diferencias dadas entre estos dos grupos, es oportuno remarcar que las ideas de Bohr y sus colaboradores fueron las que obtuvieron mayor aceptación.

La polémica no se dio en el marco de estas conferencias, las discusiones siguieron y tuvieron uno de sus puntos más intensos cuando la opinión de Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen se vio reflejada en el artículo publicado en 1935 dentro de la revista “Physical Review”, titulado “Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality be considered complete?”. Meses después de la publicación de este artículo, Bohr publica otro a manera de respuesta en la misma revista. Algunos afirman que el artículo de EPR representó la culminación del debate iniciado en la Conferencia de Solvay (Rae A. I., 1998, p. 73); otros

²² La función de onda (ψ) propuesta por Erwin Schrödinger, permite describir la evolución de los sistemas cuánticos de manera determinista, siempre y cuando no se realice una medición. Ya que la medición es la que produce lo que se conoce como “colapso de la función de onda”. Sobre esto, se hablará en la siguiente sección “Paradoja del gato de Schrödinger”.

²³ Sobre la posición de Einstein respecto a la teoría cuántica, se puede consultar el texto “Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics, 1949” recopilado en Bohr, N. (1987) *The philosophical writings of Niels Bohr*; v.2. New York: Wiley. pp. 32-66

creen que la controversia continuó hasta la Sexta Conferencia de Solvay en 1930 (Cushing, 2003, p. 307).

En la presente sección se describirá brevemente en qué consistieron ambas posturas, la dada por Bohr y sus seguidores, así como la de Einstein y sus simpatizantes, y qué significado filosófico tuvieron. Posteriormente, al igual que en las secciones anteriores se mostrará cómo dichas posturas han sido expuestas dentro de los textos de divulgación elegidos.

Interpretación de Copenhague

La interpretación de Bohr ya se había dado a conocer en el Congreso Internacional de Física celebrado en la ciudad de Como en Italia, en septiembre de 1927. La presentación de Bohr en este congreso se tituló “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica”,²⁴ e inició con las siguientes palabras:

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 que espero que sea útil a fin de armonizar los puntos de vista aparentemente conflictivos que defienden distintos científicos (Bohr, 1988, p. 98).

En el anterior fragmento, Bohr hace ver que en ese momento ya existían distintos puntos de vista con respecto a cómo considerar las implicaciones de la teoría.

Además, en esta presentación, Bohr había afirmado que no puede haber una total separación entre el fenómeno y el observador. Ahí, él manifestó por primera vez su pensamiento respecto a la “complementariedad” y dio a conocer lo que posteriormente sería conocido como “Interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica”.

A pesar de que Bohr ya había expuesto sus ideas en Como, no fue sino hasta que las expuso nuevamente en la Quinta Conferencia de Solvay, realizada un mes después, cuando surgieron réplicas por parte de Einstein, quien se encontraba presente.

Es señalado que la interpretación dada por Bohr y sus allegados no niega al realismo, ya que la interpretación se basa en la aceptación de que los objetos atómicos existen, objetos

²⁴ El título original fue “The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory” publicado en la revista Nature 121, en 1928.

que la física cuántica aspira a describir. De esta manera se puede decir que el realismo nunca significó un problema para Bohr (Navarro, 2010, p. 66), no obstante, es una idea que prevalece en los escritos dedicados a plantear el debate establecido entre Einstein y Bohr. Pero, si desatendemos la problemática que subyace en cómo entender la noción estrictamente de “realidad” en ambas posturas, la cuestión y discusión filosófica radicaría en la descripción o interpretación de los sistemas cuánticos, situación en donde quedan implícitas las problemáticas que tienen que ver con la “incompletitud” y “no localidad” de la teoría.

A partir de ello, como se mencionó anteriormente, se desprenden dos vías para interpretar la física cuántica, la de Einstein y la de Bohr. En esta sección se expondrán las ideas implicadas dentro de la interpretación de Copenhague, mientras que en la próxima sección se expondrá lo planteado por la postura de Einstein y sus allegados.

En la conferencia de Como, así como también dentro de la Conferencia de Solvay, Bohr enfatizaba el papel que jugaba la observación como perturbador de los objetos cuánticos, característica distintiva de la mecánica cuántica, ya que esa situación no se percibía en la descripción dada con los objetos a nuestra escala. Para él, la propia naturaleza de la teoría cuántica nos lleva a reconsiderar las descripciones espacio-temporales de la mecánica clásica, así como también cuestionar la afirmación de causalidad en los fenómenos.

Las palabras de Bohr para determinar lo anterior, fueron las siguientes:²⁵

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 (Jammer, 1966, p. 351).

En la Interpretación de Copenhague, la distinción entre los objetos en el mundo cuántico y

²⁵ El presente fragmento es una traducción propia de lo que presenta Max Jammer en “The conceptual development of Quantum Mechanics” y corroborada en “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica (1927)” artículo que está dentro de la compilación de “La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza. Cuatro ensayos precedidos de una introducción”, con prólogo y traducción de Miguel Ferrero Melgar.

los aparatos macroscópicos utilizados para las mediciones fue fundamental. Es a partir 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 cuántico. Es decir, las propiedades físicas que se puedan obtener del sistema, estarán en función tanto del objeto microscópico y del instrumento de medida utilizado, idea que está implícita en la concepción de “complementariedad”.

La idea de complementariedad desarrollada por Bohr, se deriva del postulado cuántico²⁶ que él atribuye a la discontinuidad, esta noción aunque no tiene una definición bien establecida, tiene ciertas características que permiten determinar sus rasgos fundamentales. Ellas se refieren a la combinación de dos o más elementos que se excluyen mutuamente, pero necesarios para una descripción completa. Los elementos a los que alude la complementariedad de Bohr se refieren a la aplicación del lenguaje de la física clásica en los fenómenos microfísicos, y a la limitación teórica de los conceptos de la física clásica en los fenómenos que se rigen por el cuanto de acción de Planck (Rioja, 1992, p. 272).

Una de las descripciones dadas por Bohr para el concepto de “complementariedad” fue la siguiente:

Adoptar los rasgos característicos de la individualidad de los fenómenos cuánticos y al mismo tiempo clarificar los aspectos peculiares del problema de la observación en el campo de la experiencia [...] En donde, para este propósito, es importante reconocer que, por mucho, los fenómenos [en la cuántica] trascienden el ámbito de la explicación de la física clásica. Esto generó una serie de discusiones respecto a su implicación de la imposibilidad de una separación nítida entre el comportamiento de los objetos atómicos y la interacción con los instrumentos de medición, que sirven para definir las condiciones en las que aparecen los fenómenos (Bohr, 1958, p. 39).

Como se dijo anteriormente, la física cuántica se mantiene bajo una descripción indeterminista de los procesos microfísicos, introducida por la observación. El punto de partida de la filosofía de Bohr es una aceptación de esta limitación, y no pretender la búsqueda de una descripción que exija un determinismo clásico (Faye, 1994, p. xiii; Arana,

²⁶ Dicho postulado se deriva del modelo atómico que Bohr propuso en 1913, en el que se supone la ruptura de la continuidad y se altera el concepto clásico de observación. El modelo atómico de Bohr está basado en dos postulados: 1) Un sistema atómico posee un número finito de estados posibles, los estados estacionarios, en los cuales un electrón en un átomo gira en órbitas determinadas sin emitir ni absorber energía radiante (lo que contraviene a la teoría clásica). Dichos estados estacionarios corresponden a una serie discreta de valores de energía y en ellos el sistema es estable. 2) Un sistema atómico emite o absorbe energía discontinuamente cuando pasa de unos estados estacionarios a otros, o también, utilizando las imágenes mecánicas clásicas, cuando salta de una órbita a otra (“saltos cuánticos”).

2002, p. 75).

Para Bohr, describir el comportamiento de una partícula, ya sea su posición o velocidad solamente será posible en el momento en el que la partícula es observada. De esta manera, lo que suceda en el lapso de tiempo entre dos observaciones pierde importancia, por lo que querer determinar la trayectoria de alguna partícula a partir de la física cuántica no tendrá sentido.

Cuando Bohr justificaba su interpretación recurría a la analogía de lo que significó la teoría de relatividad para la física. Mientras que en la relatividad se afirmaba que las propiedades físicas como longitud, duración y velocidad eran atribuibles sólo en relación a un marco de referencia, en la física cuántica las propiedades físicas de un objeto sólo son atribuibles en relación con su situación experimental.

Ambas revoluciones involucraban el reconocimiento de limitaciones en el uso de conceptos descriptivos como consecuencia de un análisis de lo que se puede determinar empíricamente. Así, Bohr refirió ambas revoluciones como la enseñanza de lecciones epistemológicas análogas, y trató de utilizar este hecho para convencer a Einstein de la solidez de su interpretación de la mecánica cuántica (Faye & Folse, 1994, p. xiii).

De acuerdo a lo anterior y a manera de resumen, se puede decir que la “Interpretación de Copenhague” fue promovida principalmente por Bohr, quien dedicó varios artículos para tratar de aclarar su posición respecto al significado que se encontraba detrás del formalismo de la física cuántica. Dicha posición implicó la separación con los ideales de la física clásica, estos ideales son el carácter determinista de las teorías y su objetividad. Por otro lado, Bohr al introducir su concepto de “complementariedad” indicó que los conceptos establecidos en la física clásica son incompatibles pero necesarios para la descripción en los fenómenos microfísicos.

Ahora se presentará lo correspondiente a los textos de divulgación para observar cómo se aborda la “Interpretación de Copenhague”. Los textos que incluyen información respecto a ello son: el “Safari cuántico”, cuento de George Gamow, “Alicia en el país de los cuantos” de Robert Gilmore, “En busca del gato de Schrödinger” de John Gribbin, y las conferencias de Richard Feynman. La presentación se dará conforme al anterior listado.

En el cuento de “Safari cuántico” compilado en el “Breviario del Señor Tompkins” de George Gamow²⁷, se describe un sueño del Señor Tompkins en el que viaja junto con el

²⁷ También se puede encontrar con el título de “Cuarto sueño: más incertidumbre” en “El país de las maravillas” (1958).

profesor de física al safari cuántico, lugar en el que los objetos que se encuentran en esa región están sujetos a leyes cuánticas. Aquí la constante de Planck en dichos objetos toma un valor muy grande por lo que el efecto en el comportamiento de los objetos es perceptible a simple vista.

En esta historia el autor no hace referencia directa acerca de la posición de Bohr o Einstein, solo muestra el papel que juega la observación en los objetos cuánticos.

En el safari cuántico las hojas de los árboles vibran en consecuencia de ser observadas (Gamow, 2009, p. 162), en palabras del profesor de física se dice que “al hacer cualquier observación es inevitable perturbar el objeto que está siendo observado”. Por otro lado, mientras no haya observación no es posible saber cómo es el comportamiento de los objetos. En este sentido, el diálogo que se da entre el profesor y el señor Tompkins muestra que es en la observación donde existe un problema desde el punto de vista filosófico, pero que no debería considerársele de importancia. Así se presenta:

Mientras avanzaban entre los árboles, el señor Tompkins siguió pensando.

- ¿Y si nadie estuviera mirando? – preguntó -. ¿Todo se comportaría entonces correctamente? Quiero decir, ¿las hojas se comportan como 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 decir que es filosofía, pero en realidad es una pregunta sin sentido. Si algo está claro [...] 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 [...] 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. Toda la física moderna está basada en la relación mutua de éstos... (Gamow, 2009, p. 162).

De alguna manera, en el anterior fragmento se puede percibir la posición en la que se encuentra el profesor de física, y si lo extrapolamos, la posición del autor mismo respecto a la interpretación. De acuerdo con lo expresado, se advierte una aproximación a la interpretación ortodoxa al aludir que no se puede designar valor alguno a aquello que no pasa por la

observación, o bien que no pueda ser demostrado experimentalmente. También se hace ver un acercamiento al pensamiento positivista de la época.

Ahora bien, al trasladarnos al texto de Robert Gilmore que también desarrolla la argumentación a través del cuento, encontramos una sección completa con el título “La escuela de Copenhague”. En esta sección el autor comienza el relato con Alicia dentro de un bosque, en el que se encuentra frente a una bifurcación de caminos, debido a la inseguridad del personaje por decidir sobre algún camino en particular opta por tomar los dos caminos, y a la vez, tomar los otros cuatro caminos que estaban más adelante (en cada uno de los caminos de la primera bifurcación se encontraban otras desviaciones que llevarían hacia otros dos caminos cada uno). El poder tomar los cuatro caminos a la vez es posible porque el mundo en el que se encuentra Alicia es el mundo cuántico, donde los objetos convergen en varios estados a la vez, a esta característica se le conoce como “superposición de estados”.²⁸

Por ello, es posible para Alicia tomar todos estos caminos a la vez, donde el autor va describiendo qué escenarios encuentra en cada uno de ellos. De esta manera, el autor representa una superposición de estados de Alicia. Sin embargo, llega un momento en la descripción en el que Alicia es observada y ella se encuentra en un solo sitio, un aula de clases.

En esta aula, el profesor que está presente le explica el por qué ella se encuentra en ese lugar, recordándole que ella se encontraba en varios estados (o lugares) a la vez, pero que al haber sido observada ella colapsó²⁹ en un estado, que fue precisamente esa aula.

A pesar de ello, Alicia seguía confundida ante tal situación y mencionó al profesor:

–En realidad no veo cómo puede ser así –replicó Alicia [...]–. ¿Qué diferencia existe entre que yo fuera observada o no? Es seguro que he de estar en un sitio u otro con independencia de que alguien me vea.

–¡En absoluto! Después de todo, no puedes decir lo que sucede en cualquier sistema, si no lo observas [...] el sistema se hallará en una superposición de estados correspondiente a todas las cosas que podría hacer. Ésa será la situación hasta que se mire para ver lo que se está haciendo [...] el estado observado es el real (Gilmore, 2011, p. 97).

²⁸ La superposición de estados en la física cuántica es una característica de los objetos cuánticos, la cual indica que dichos objetos son capaces de poseer dos o más valores de una magnitud observable, ya sea su posición o energía, por mencionar algunos. Sobre la característica de “superposición de estados” se hablará más ampliamente en la sección de “La paradoja del gato de Schrödinger”.

²⁹ El “colapso de la función de onda” se refiere a la consecuencia de querer precisar un estado del sistema a partir de realizar alguna medición sobre algún sistema cuántico. De todos los posibles estados en los cuales se puede encontrar un sistema, al realizar la medición, se recae en un solo resultado. Otro aspecto que representa dicho colapso, es que la función de onda, de dar una evolución determinista del sistema pasa a ser indeterminista.

Con respecto a lo anterior, en el desarrollo de la narración se hace notar la importancia que tiene la observación para determinar a los objetos cuánticos. En este caso, el objeto cuántico se trata de Alicia. Se enfatiza que dicho acto de observación, que fue hecho por los personajes del aula, es lo que proporciona realidad a los objetos que se encuentran en cierto momento en estado de superposición. Además de ofrecer una descripción de cómo es que los objetos cuánticos son tomados como entidades reales, dentro del relato se hace mención a través del ejemplo en el que Alicia se encontraba en todos los caminos del bosque a la vez, de la característica de superposición de estados en la que se encuentran los objetos cuánticos mientras no son observados.

Será pues, a través de la mención acerca de la importancia que tiene la observación para medir objetos cuánticos que el autor alude al “problema de la medición”. Este problema se relaciona con lo dicho anteriormente, consiste a grandes rasgos, en que las propiedades de los objetos cuánticos no pueden ser definidas hasta que se haga una medición, es decir, que exista una observación y se produzca el colapso de onda. La pregunta de la realidad se hace presente. En este punto cabe la pregunta sobre la realidad ¿existe tal objeto antes de la observación? Cuando las propiedades necesarias para hacer una descripción física del mundo solamente toman valores concretos al ser observados, el carácter “real” se vuelve fenoménico.

Retomando el texto de Gilmore, en la charla de Alicia y el profesor, Alicia hace un comentario para manifestar que ha comprendido las implicaciones de estar en un estado de superposición introduciendo el problema de la medición. Para ello menciona:

¡Si el principio de superposición cuántico ha de operar en todas partes, no es posible realizar medidas en absoluto! Cualquier medida que se trate de hacer podría tener varios resultados posibles. Podría observarse cualquiera de esos resultados, y de acuerdo con sus reglas, si puede observarse cualquiera de ellos, tendrían que observarse todos ellos. Los resultados de la medida estarían todos presentes en una nueva versión de esa superposición de estados de la que habla usted. Nunca se podría observar nada realmente, o, más bien, nunca habría nada que no se pudiera observar (Gilmore, 2011, p. 100).

Es importante destacar, que al margen del relato se presenta un recuadro en el que Gilmore presenta, en líneas generales, en qué consiste la Interpretación de Copenhague. Este recuadro se caracteriza por estar en relación con la historia narrada pero con un lenguaje un

poco más académico.³⁰ La información en este recuadro es presentada de la siguiente manera:

La versión «ortodoxa» de la mecánica cuántica es la Interpretación de Copenhague (llamada así por el físico danés Niels Bohr, no por Hans Christian Andersen).³¹ Cuando en un sistema podrían suceder diferentes cosas, existirá una amplitud para cada una de ellas, y el estado del sistema viene dado por la suma, o superposición, de todas estas amplitudes. Cuando se realice una observación, se encontrará un valor que corresponde a una de estas amplitudes, y las amplitudes excluidas se anularán; este proceso se conoce como *reducción de las amplitudes* (Gilmore, 2011, p. 98).³²

A manera de resumen, es a través de la estancia de Alicia en la “Escuela de Copenhague” que Gilmore hace ver las problemáticas que tienen que ver con la observación y el “problema de la medición”. A pesar de que no hace una referencia directa a Bohr en la narración (exceptuando el recuadro informativo mostrado arriba), se logran presentar las ideas que suscitan cierto desconcierto, permitiendo entrever las cuestiones filosóficas que conlleva la física cuántica.

En lo que respecta a John Gribbin, quien también dedica una sección para abordar la “interpretación de Copenhague”, comienza haciendo mención de la conferencia dada por Bohr en Como Italia en 1927.

El resumen de Gribbin sobre lo que Bohr mencionó en dicha conferencia es el siguiente:

[Bohr] Señaló que mientras en la física clásica concebimos que un sistema de partículas en dirección funciona como un aparato de relojería, independientemente de que sean observadas o no, en física cuántica el observador interactúa con el sistema en tal medida que el sistema no puede considerarse con una existencia independiente (Gribbin, J., 1986, p. 139).

Posteriormente, Gribbin procede a presentar la aceptación que tuvo dicha interpretación:

Hoy, las características de la interpretación de Copenhague se pueden explicar y entender más fácilmente en términos de lo que pasa cuando se efectúa una observación experimental. En primer lugar, se ha de aceptar que el mero hecho de observar una cosa la

³⁰ La exposición de información técnica sobre alguna temática en particular, es una herramienta muy utilizada en la divulgación a manera de complemento del discurso. Dentro de la comunicación de la ciencia, este tipo de herramientas recaen en el “modelo de déficit” por considerar oportuna la presentación de información con un grado más académico para favorecer el entendimiento.

³¹ (1805-1875) Escritor y poeta danés reconocido por sus cuentos para niños “El patito feo” y “La sirenita”.

³² Otra forma de hacer alusión al “colapso de la función de onda”.

cambia y que el observador forma parte del experimento; es decir, no hay un mecanismo que funcione independientemente de que se le observe o no. En segundo lugar, toda la información la constituyen los resultados de los experimentos [...] Lo que se puede deducir de los experimentos o de las ecuaciones [...] es la probabilidad de que si al observar el sistema se obtiene el resultado A, otra observación posterior proporciona el resultado B. Nada se puede afirmar sobre lo que pasa cuando no se observa, ni de cómo pasa el sistema de A a B, si es que pasa (Gribbin, J., 1986, p. 140).

Seguido a esto, se logra distinguir la posición respecto a la interpretación que el autor favorece:

Los «malditos saltos cuánticos» que tanto incomodaban a Schrödinger son simplemente una interpretación subjetiva de por qué se obtienen dos resultados diferentes para el mismo experimento, y es una falsa interpretación. A veces las cosas se observan en el estado A, a veces en el B, y la cuestión de qué hay en medio o de cómo pasan de un estado a otro carece completamente de sentido. Ésta es la característica esencial del mundo cuántico (Gribbin, J., 1986, p. 140).

Con estos fragmentos, Gribbin sugiere la idea esencial que se desprende de la “Interpretación de Copenhague”. No obstante, después de mostrar reiteradamente lo que denota dicha interpretación, en el apartado de “Interpretación de Copenhague” introduce la explicación del experimento de los dos agujeros o también conocido como experimento de las dos rendijas. En este espacio hace alusión a la discusión planteada por Richard Feynman, él afirmó que éste experimento se trata de un elemento básico para la teoría cuántica.

Este experimento es un ejemplo en el que se muestra la superposición de estados en los que se encuentra un objeto cuántico. En el experimento los objetos se tratan de fotones que se encuentran en superposición de estados hasta que son observados. Para entrar a detalle de dicho experimento nos trasladaremos al texto de Feynman en el que lo describe, es en el capítulo de “Probabilidad e incertidumbre” dentro de la obra de “El carácter de la ley física”³³.

Antes de iniciar la explicación del experimento, Feynman menciona que utilizará analogías para referirse a las partículas y ondas, para las primeras utilizará la imagen de balas, mientras que para las ondas recurrirá a las ondulaciones que se perciben en una superficie de agua. El modo de proceder para dar la explicación, es mostrar los resultados que se dan cuando el experimento se realiza con partículas, después qué sucedería cuando se utilizan ondas, y una

³³ La descripción del experimento de las dos rendijas también está presente en el apartado de “Comportamiento cuántico” en “Seis piezas fáciles”, este texto varía mínimamente en su redacción con respecto al del “Carácter de la ley física”. Por ser tan similares aquí solo se considerará el mencionado para no hacer reiterativa la información.

tercera versión del experimento es describir qué pasa realmente cuando se utilizan fotones o electrones.

Para Feynman, el experimento de la doble rendija muestra “un fenómeno que resulta imposible, absolutamente imposible de explicar clásicamente, y que contiene la esencia de la mecánica cuántica” (Gribbin, J., 1986, p. 143). Este experimento consiste en “suponer que tenemos una ametralladora que dispara balas a través de un agujero en una plancha blindada”, a cierta distancia de esa plancha se encuentra otra plancha que tiene dos agujeros, y después de esta última estará una pantalla que tendrá un detector, “pudiendo ser una caja de arena que permita recoger las balas y contarlas” (Feynman, 2005, p. 145). El experimento consistirá en contar el número de balas en la caja de acuerdo a distintas posiciones en un periodo de tiempo determinado, “llamando x a la altura de la caja sobre la pantalla”.

Para este experimento se tendrán en cuenta tres consideraciones:

1. Las balas salen disparadas en varias direcciones, de manera que algunas rebotan en los bordes de los agujeros de la primera plancha.
2. Todas las balas poseen la misma velocidad o energía.
3. Las balas son indestructibles, por lo que representan unidades enteras. (Feynman, 2005, p. 145).

También hay que tomar en cuenta que la ametralladora dispara lentamente para captar lo que ocurre entre disparos. Al contar y sacar el promedio del número de balas en la caja de arena se obtendrá un resultado que variará de acuerdo a la posición de dicha caja o detector, recordemos que la caja está en movimiento a través de la pantalla. Cuando ambos agujeros están abiertos, el número de balas corresponderá al número de balas que llegan por el agujero no.1 más las del no. 2. La representación gráfica de esta suma da como resultado una curva. Este fenómeno Feynman lo reconoce como “no interferencia”. Esto es lo que corresponde al experimento con balas.

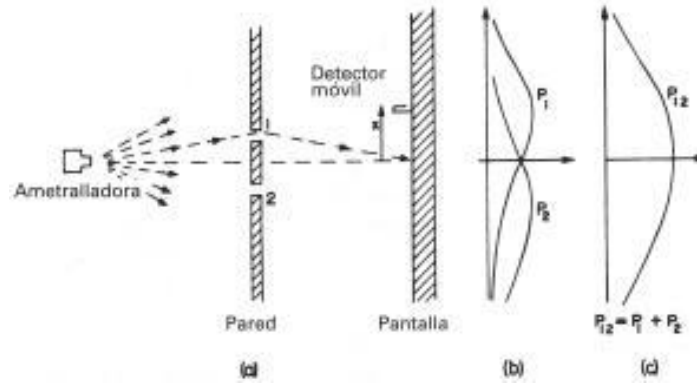


Figura 1: Experimento de interferencia con balas

Ahora, en lo que respecta al experimento de ondas, este consiste en tener una fuente generadora de ondas, esta será “una gran mole que se deja caer al agua y luego sube”. La plancha que se encontraba en el experimento de balas se cambia por “un espigón con un agujero en medio [...] como barrera se pondrá 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”, menciona Feynman. En este experimento, lo que se medirá será la oscilación del agua.

Estamos midiendo la intensidad de las ondas [...] si las ondas son muy tenues, 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 (Feynman, 2005, p. 148).

Los resultados obtenidos difieren de acuerdo a la abertura de los agujeros (si los dos agujeros están abiertos o si las ondas pasan sólo por un agujero cuando el otro está cerrado). Cuando uno de los agujeros está cerrado, el resultado es similar al experimento de las balas, las curvas obtenidas son idénticas. Por otro lado, cuando los dos agujeros están abiertos se presenta el fenómeno de interferencia, en donde la curva resultante no es equivalente a la suma de las curvas que se generan cuando alguno de los agujeros está cerrado. Es decir, la curva resultante es distinta a la obtenida con el experimento de balas cuando los dos agujeros están abiertos. Aquí no será necesario entrar en los detalles técnicos que Feynman introduce en su descripción, ya que lo importante es mostrar cómo el autor utiliza estos experimentos para representar nociones de la física cuántica.

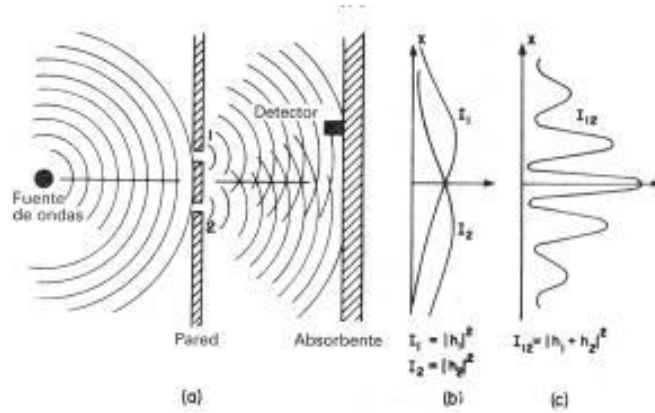


Figura 2: Experimento de interferencia con ondas de agua

En lo que respecta al tercer y último experimento, los objetos a medir son electrones, en donde “la fuente de electrones es un filamento, las barreras son planchas de tungsteno con los correspondientes agujeros, y como detector se utiliza un sistema eléctrico lo bastante sensible para registrar la carga de cualquier electrón que llegue al aparato.” Feynman menciona que lo registrado con el detector eléctrico son clics que representan unidades enteras, es decir, que los electrones llegan en unidades con cierta magnitud determinada. Considerando eso, se produce el mismo efecto que en el experimento con balas y se podrá medir la probabilidad de llegada.

Lo que se realiza en el experimento es “colocar el detector en posiciones distintas, [manteniendo] el detector en cada posición durante, digamos, una hora y se miden cuántos electrones han llegado ¿Qué curva obtenemos?”, pregunta Feynman (2005, p. 151).

El resultado que se obtiene en este último experimento es una curva igual a la que se genera cuando interfieren ondas, pero con la diferencia de que la probabilidad de llegada se da en unidades, similar al caso de las balas.

La cuestión es explicar cómo es posible que cuando los electrones pasan a través del agujero no. 1 estén distribuidos de una manera, que cuando pasan por el agujero no. 2 lo estén de otra y, sin embargo, cuando ambos agujeros están abiertos no se obtiene la suma de ambas distribuciones (Feynman, 2005, p. 152).

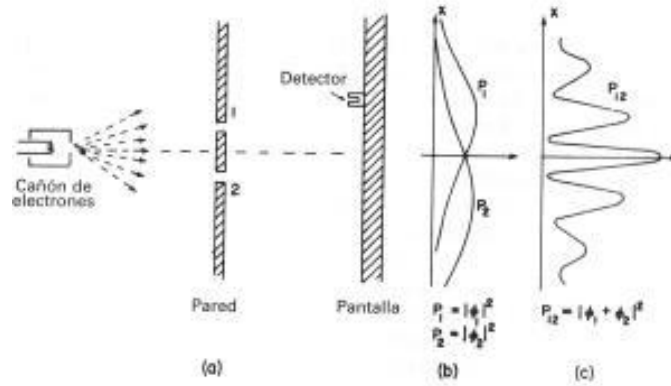


Fig. 3 Experimento de Interferencia con electrones

Feynman concluye:

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. Esto es todo lo que podría decirse (Feynman, 2005, p. 153).

Sin embargo, esta no es la conclusión de la conferencia. A partir de la introducción de estos cuestionamientos en el comportamiento de los electrones que parecieran no ser evidentes, Feynman procede con analizar el caso. Extrae una proposición de los experimentos realizados que afirma: “Un electrón o pasa por el agujero no. 1 o pasa por el agujero no. 2”. Para verificar esa proposición, propone observar a los electrones con luz, colocando detrás de cada agujero una fuente de luz. Al poner en marcha el experimento, ahora con luz para poder observar, el resultado es que “cada vez que el detector recibe un electrón vemos un destello o en agujero no. 1 o en el no. 2. Lo que vemos es que todas las veces el electrón pasa por entero por uno de los agujeros. ¡Paradoja!”. Tras declarar lo anterior, Feynman analiza lo que sucede, sin embargo, su conclusión es solo la afirmación del comportamiento extraño de los electrones:

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 [...] 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 (Feynman, 2005).

Para Feynman, la interferencia que se presenta en el comportamiento de los electrones es una característica que no se puede evitar. Por lo que, poder predecir por cuál agujero han pasado los electrones también será imposible.

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 circunstancias, poder predecir lo que ocurriría a continuación (Feynman, 2005).

De esta manera, a través del análisis del experimento de las dos rendijas es como Feynman muestra el fenómeno de interferencia en los electrones, es este fenómeno el que conlleva a cuestionarse sobre las peculiaridades que la física cuántica tiene implícitas. Son estas peculiaridades, las que se despegan de los propósitos que se buscaban a partir de la física clásica, siendo uno de ellos la imposibilidad de predicción.

En el desarrollo de la descripción de los experimentos, Feynman va haciendo hincapié de que el comportamiento de la naturaleza es así. A través de toda su explicación nunca hace mención de la “Interpretación de Copenhague”, ni de las ideas propuestas por Bohr.

Artículo EPR

El mayor reto para la Interpretación de Copenhague hasta ese momento fue el argumento de Albert Einstein y sus colegas Boris Podolsky y Nathan Rosen³⁴. En 1935 ellos publicaron en “Physical Review” un artículo en el que manifestaban sus dudas respecto a la teoría cuántica, dicho artículo fue titulado “¿Puede considerarse completa la descripción física de la Mecánica Cuántica?”³⁵ (Para referirnos al artículo aquí se recurrirá a “EPR”). A grandes rasgos, en EPR ellos indicaban que la teoría cuántica era incompleta.³⁶

Aceptaban el formalismo matemático que se había desarrollado alrededor de la teoría, pero se oponían en lo que concernía a la interpretación de dicho formalismo, es decir, a la descripción de la realidad basada en el carácter estadístico y a la pérdida de una descripción

³⁴ Por las iniciales de cada uno de ellos, el argumento que plantearon se reconoce como EPR.

³⁵ “*Can Quantum-Mechanical description of Physical Reality be considered complete?*”

³⁶ Se considera que EPR fue hasta ese momento el mayor reto, ya que anteriormente no se habían dado argumentos que cuestionaran fuertemente a la Interpretación de Copenhague. Posteriormente, la característica intrínseca de no-localidad que EPR señalaba, fue probada a través de los experimentos realizados por Alain Aspect en 1983, por lo que el carácter no-local de la teoría quedó corroborado.

determinista. A pesar de que las anteriores posiciones se les adjudican a Einstein y sus colegas, al remitirnos al artículo de EPR lo que se observa es que el objetivo solamente es mostrar la incompletitud de la mecánica cuántica.

Para Einstein y sus colegas, el criterio de completud de una teoría tenía que ver con que los términos que ella contiene, deberían corresponder a alguna propiedad que coincida con la realidad. Un ejemplo podría ser cuando en una descripción clásica de un sistema, como el de un planeta moviéndose alrededor del sol, existen términos que representan la posición (r), el impulso (p) y las demás propiedades del sistema. De esta manera, una teoría completa permitiría obtener valores de estas propiedades sin ninguna incertidumbre y sin perturbaciones en el sistema, de ser así, dichas propiedades tienen una existencia real en la naturaleza y su valor puede ser predicho (Cushing, 2003, p. 319).

En el artículo de EPR, lo anterior fue manifestado al inicio del mismo de la siguiente manera:

Para que una teoría sea completa, a cada elemento de la realidad le ha de corresponder un elemento de dicha teoría. Una condición suficiente para que una magnitud física sea real es la posibilidad de predecirla con exactitud y sin alterar el sistema [...] En la mecánica cuántica (1) la descripción de la realidad dada por la función de onda no es completa, o (2) dos magnitudes físicas no pueden ser reales simultáneamente. Al considerar el problema de realizar predicciones concernientes a un sistema, basándonos en mediciones practicadas en otro sistema que previamente ha estado en interacción con el primero, llegamos al resultado de que, si la posibilidad (1) es falsa, entonces la (2) también es falsa. En consecuencia llegamos a la conclusión de que la descripción de la realidad tal como la da una función de onda no es completa (Einstein, Podolsky, & Rosen, 2005).

Para valorar como incompleta a la Interpretación de Copenhague, Einstein y sus colegas se basaban en las implicaciones del principio de incertidumbre de Heisenberg dentro de la teoría. Sus implicaciones estaban relacionadas con la imposibilidad de establecer valores definidos en un mismo instante. Por ejemplo, cuando el momento de una partícula es conocido, su posición no tendría un valor definido.

De acuerdo al filósofo de la física Arthur Fine, el argumento de la incompletitud de la mecánica cuántica puede implicar dos posiciones. La primera de ellas es que la teoría puede ser completada sin cambiar los presupuestos básicos y las predicciones estadísticas, a partir

de variables ocultas³⁷. Por otro lado, podría sugerir 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 (Bohr's response to EPR, 1994, p. 4).

Para demostrar la afirmación de la incompletitud de la teoría, en el artículo se expone un experimento pensado. Se proponía un sistema formado por dos partículas que en un momento dado interactúan y luego se separan. Tal interacción les permitiría vincular sus coordenadas espaciales y también sus momentos o impulsos, creando así un enredamiento que al determinar la posición o momento de alguna de las partículas participantes, permitiría dar al mismo tiempo con la posición o momento de la otra partícula, presumiblemente sin afectarla. De esta manera, para ellos existía una contradicción en la teoría. Si se afirmaba que las magnitudes eran no conmutativas, como se declaraba en el principio de incertidumbre, y al presentar el enredamiento mostraban una realidad simultánea, esta misma situación contradecía a la propia no-localidad.³⁸

El principio de localidad, de acuerdo a la formulación de Einstein, se refiere a que el estado de cosas de un sistema (S_1), en cierto espacio, es independiente de otro sistema (S_2), de tal manera que lo que se realice en el sistema S_1 no influirá al sistema S_2 (Schilpp, 1969, p. 83), sin embargo, esta situación no se presenta con los sistemas cuánticos. Ellos presentan la característica de ser no-locales, es decir, existe una conexión entre los sistemas, ejemplo de ello se presenta en el enredamiento cuántico.

Es decir, la idea de enredamiento cuántico implícita en la teoría, no era bien vista por Einstein y sus colegas, ya que ellos no estaban de acuerdo con la noción de no-localidad que se implicaba. Esta idea, resumiendo, consistía en la afirmación de que el estado de alguna partícula se encuentra ligado a otra, o bien, el estado de una partícula se encuentra ligado a todo el sistema.

³⁷ En el artículo EPR se propone algo similar a la concepción de variables ocultas, pero en dicho artículo no se hace una exposición detallada. Fue posteriormente cuando se desarrolló la teoría de variables ocultas.

³⁸ El experimento fue descrito en el artículo de la siguiente manera: "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 transcurrido este intervalo, ya no hay interacción entre ambas partes [...] Con la ayuda de la ecuación de Schrödinger, podemos calcular el estado del sistema combinado I+II en cualquier momento posterior a 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, Podolsky, & Rosen, 2005)

En EPR se declaraba que las velocidades y las posiciones de las dos partículas, propuestas en el ejemplo, se encontraban definidas antes de la medición a causa de un “principio de realidad” que decía lo siguiente: “Si, evitando cualquier alteración de un sistema, podemos predecir con exactitud el valor de una magnitud física, entonces existe un elemento de la realidad física que se corresponde con esta magnitud”. En EPR, el cumplimiento de este criterio de realidad era suficiente tanto para la física clásica como para la cuántica.

Al afirmarse que la teoría cuántica estaba incompleta, se dio paso para que se creara otro tipo de interpretación de la física cuántica, ésta fue la teoría de variables ocultas que buscaba restablecer el principio de localidad, pero que este objetivo no se logra.³⁹ Es decir, debido a la incompletitud de la teoría harían falta parámetros medibles, que en la Interpretación de Copenhague no se estaban tomando en cuenta. Al encontrar estos parámetros sería posible obtener una teoría determinista y completa.

Desde la publicación de este artículo se han generado varias investigaciones al respecto, y los análisis en muchas de las publicaciones se han dado desde una perspectiva filosófica, ya que la cuestión implícita en ello está relacionada con la pregunta por “la realidad” del mundo y “el conocimiento” sobre ella. Tal es el caso, con el trabajo del físico irlandés John Stewart Bell en los años sesentas, que fue una secuela del artículo EPR. En el teorema de Bell que se argumenta en contraposición de EPR, se dice que “ninguna teoría física de variable ocultas locales puede reproducir todas las predicciones de la física cuántica”. En otras palabras, esa no-localidad que “significa que las distintas partes de un sistema cuántico parecen influir unas en otras incluso aunque estén separadas a gran distancia y aunque no exista interacción alguna conocida entre ellas” (Rae A. I., 1998, p. 14), es una característica de la mecánica cuántica en sí, y resulta (a través del teorema de Bell) que es necesariamente también una característica de los cálculos producidos por las predicciones estadísticas (Albert, 1994, p. 70).

Estas últimas temáticas son las que hasta la actualidad se discuten en el campo de la

³⁹ Es importante resaltar, que dentro del artículo EPR no se desarrolla esta teoría. Ésta fue expuesta posteriormente en la interpretación dada por Bohm en 1952. La propuesta hecha por Bohm es conocida como “teoría de variables ocultas no locales”. Su postura se basó en las ideas de Louis de Broglie, afirmando que a cada partícula le corresponde una función de onda que permitirá definir su movimiento (retomando la ecuación de Schrödinger). La propuesta de Bohm estuvo muy apegada con el formalismo de la escuela ortodoxa, dando también resultados probabilísticos. Con la diferencia de que las partículas materiales poseen una posición perfectamente determinada, en términos de variables ocultas, es decir, se trataba de una dinámica determinista. Considerando que la característica “aparente” de ser aleatoria se debe a nuestras limitaciones epistémicas. Cabe destacar, que la teoría de Bohm presenta como característica inesperada la no-localidad.

filosofía de la física, que bien es cierto, necesitan un mayor análisis que el que se ofrece en el presente trabajo. Sin embargo, son mencionados para mostrar cómo desde los inicios de la cuántica se han generado problemáticas que aún siguen en discusión.

Ahora pasaremos a los textos de divulgación para mostrar cómo se expone la postura de Einstein y sus colaboradores.

Dentro del texto de Gilmore, “Alicia en el País de los cuantos”, la forma en el que el autor hace alusión a las ideas planteadas en EPR, es por medio de la referencia a las “variables ocultas”. Dentro del cuento se menciona que Alicia se encuentra en la “Escuela de Copenhague”, al estar presenciando las exposiciones de los alumnos, el personaje identificado como el “mecánico clásico” se presenta en el aula sorpresivamente junto con una máquina muy parecida al juego de pinball que en realidad se trataba de un “interceptor de electrones”.

Tenía la forma de una mesa inclinada, con dos rendijas arriba a través de las cuales se disparaban las partículas y una fila de “bolsillos” a lo largo de la parte inferior que estaban marcados alternativamente con “gana” y “no gana”. [El mecánico clásico dijo] –He observado con cuidado este aparato, que es básicamente un dispositivo normal de doble rendija para interferencia de electrones, y creo saber lo que realmente sucede.

[El mecánico] mostró rápidamente el funcionamiento de la máquina disparando una ráfaga de electrones a través de las dos rendijas. [Alicia] no fue capaz de ver dónde estaban realmente los electrones hasta que se registró la llegada de éstos a lo largo de la parte inferior de la mesa. Como ella esperaba, los electrones se apilaron en una serie de montones, con huecos entre ellos, donde se habían detectado muy pocos electrones. Alicia se intrigó al ver que esos huecos en el patrón de interferencia se correspondían estrechamente con los bolsillos marcados “gana”.

-Ven que la interferencia se produce y arguyen que eso muestra que los electrones han pasado de alguna manera a través de ambas rendijas, de modo que la combinación de amplitudes de las dos rendijas produce el patrón de interferencia que vemos. Yo les digo que ahora que cada uno de los electrones pasa de hecho por una sola rendija, de manera perfectamente razonable. ¡La interferencia se debe a variables ocultas!

El Mecánico Clásico pareció sacar de la mesa de juego una sobrecubierta que aparentemente no había estado allí. Fuera como fuera, el caso es que vio que la superficie de la mesa estaba cubierta con un patrón de profundas ranuras y crestas que salían de las dos ranuras.

- ¡He ahí las variables ocultas! – exclamó el Mecánico.

- Mi aseveración- comenzó diciendo el Mecánico Clásico, ignorando con toda intención el comentario de Alicia- es que los electrones y otras partículas se comportan de modo racional

y ciertamente clásico, casi completamente igual que las partículas que me son familiares en el Mundo Clásico. La única diferencia es que aquí, además de la fuerza que actúa sobre las partículas, éstas se ven afectadas por una fuerza cuántica especial, u onda piloto. Esto causa que los extraños efectos que ustedes interpretan como debidos a la interferencia. En mi demostración con la máquina de electrones presente, cada electrón entra realmente por una u otra rendija, y después se mueve por la mesa de manera respetable y predecible (Gilmore, 2011, p. 114).⁴⁰ // Convendría que señales que esto es una alusión a la interpretación de Bohm

Ante la exposición del Mecánico Clásico, el Mecánico Cuántico le replicó que su explicación no era suficiente, ya que no daba cuenta a la interferencia con más de dos partículas. Además de que dicha versión no respetaría el principio de “acción y reacción”, idea que contradecía la Ley de Newton. Así, el Mecánico Cuántico despidió al Clásico:

–Ven –le dijo–. Seguramente no desearás verte involucrado en una acusación de herejía dentro de la mecánica clásica por dudar de las leyes de Newton. Toda esta discusión académica sobre lo que los electrones realmente pueden o no pueden hacer no es de nuestro interés. Nosotros somos mecánicos. Como tal, lo que me interesa fundamentalmente es que la mecánica cuántica funciona de verdad y funciona bien [...] Mi tarea no consiste en preocuparme acerca de lo que hacen los electrones cuando no los miro, mientras pueda decir lo que probablemente van a hacer cuando los miro (Gilmore, 2011, p. 115).

Respecto a lo anterior, a pesar de que el “Mecánico Clásico” expuso su posición sobre el comportamiento de las partículas, fue criticado por el “Mecánico Cuántico” despidiéndolo de la sala, mostrando el desacuerdo en relación a su versión. Manifestándole además, que lo más importante para los físicos o mecánicos, tal como se mencionó dentro del texto, son los resultados obtenidos.

A través del texto se muestran algunas otras interpretaciones, distintas a la Interpretación de Copenhague, que se le dan a la física cuántica. Sin embargo, en cada presentación se alude a cómo son contra-argumentadas y, de esta manera, cómo sigue “sobreviviendo” la de Copenhague. No obstante, es importante señalar que las críticas que el autor realiza a las otras posturas, a través de los personajes del cuento, no cuentan con una gran argumentación para rebatir las distintas posiciones, sino que su posición solo se observa en un tono de desacreditación.

Por otra parte, en “En busca del gato de Schrödinger”, John Gribbin tiene un apartado

⁴⁰ Esto puede considerarse como una alusión a la interpretación de Bohm.

titulado “Paradojas y posibilidades”; en él se incluye la “Paradoja de EPR”. La primera frase con la que introduce esta sección es la siguiente: “Cada ataque contra la interpretación de Copenhague ha reforzado su posición” (1986, p. 155). Con este preámbulo se puede percibir la posición que el autor adopta para exponer las paradojas.

Al describir la propuesta que se dio en EPR, basándose en primera instancia en un experimento imaginario, se inicia mencionando que la idea básica que subyace “consistía en utilizar la información experimental sobre una partícula para deducir propiedades, como la posición y el momento, de una segunda partícula”. Es aquí donde Gribbin afirma que en este caso, este experimento si fue contrastado experimentalmente en laboratorio, por lo que perdió el carácter de ser imaginario. Sin embargo, enuncia que a pesar de ello “Bohr es quien resulta ganador y Einstein derrotado”.

Después de estas afirmaciones, describe brevemente en qué consistió el artículo desarrollado por Einstein, Podolsky y Rosen entre 1934 y 1935 durante su estancia en Princeton.

El punto básico es: de acuerdo con Einstein y sus colaboradores, la interpretación de Copenhague debía considerarse como incompleta; en realidad existe algún mecanismo subyacente que opera en el Universo y que sólo da la apariencia de incertidumbre e impredecibilidad al nivel cuántico a través de variaciones estadísticas. De acuerdo con este punto de vista, existe una realidad objetiva, un mundo de partículas con momento y posición definidas simultáneamente de forma precisa aun cuando no estén sometidas a observación.

[...] Si se acepta la interpretación de Copenhague, concluye el artículo E.P.R., se «llega a que la realidad de la posición y el momento del segundo sistema depende del proceso de medida llevado a cabo en el primer sistema, que no ejerce ningún tipo de perturbación sobre el segundo. No cabe ninguna definición razonable de realidad que permita esto». Aquí es donde el equipo divergía claramente de la mayor parte de sus colegas y de toda la escuela de Copenhague. Nadie estaba en desacuerdo con la lógica de la argumentación, sino que discrepaban en lo que constituye una definición razonable de realidad (Gribbin, J., 1986, pp. 159-160).

En estos dos breves párrafos se hace alusión a los conceptos que se cuestionan en EPR, a la incompletitud de la teoría y al cuestionamiento de la realidad. Esto se menciona sin dar detalles del argumento planteado en el artículo, por lo que solo se arroja la información de manera informativa. Al hacer mención al desacuerdo que se tenía con respecto a la definición de la realidad, podría decirse que implícitamente se presenta en el texto la problemática

filosófica, pero esta declaración no se hace abiertamente. Siendo así, es difícil afirmar que el autor tuviera la intención de manifestar la relación que tuvo el artículo EPR con las cuestiones filosóficas implícitas. Sino que el propósito de presentar las ideas planteadas en EPR parecieran ser meramente informativas y hacer ver que las críticas que se hicieron en dicho artículo fueron refutadas por el propio Bohr y posteriormente por los resultados experimentales, situación que Einstein hubiera aceptado, de acuerdo a Gribbin, si hubiera estado presente en esa época. Sobre esto, Gribbin escribió:

Einstein era una persona honesta, siempre dispuesto a aceptar la evidencia experimental sólida. Si hubiera vivido para verlo, ciertamente habría sido persuadido por las recientes confirmaciones experimentales de que estaba equivocado. La realidad objetiva no tiene cabida en una descripción fundamental del Universo; en tanto que sí la tiene la acción a distancia o la acausalidad (Gribbin, J., 1986, p. 160).

Regresemos ahora a la conferencia de Feynman, donde describe el experimento de las dos rendijas, desde el comportamiento con balas, ondas y electrones. Feynman muestra que en el comportamiento de los electrones se presentan diferencias dependiendo a si son observados o no, teniendo un comportamiento confuso que no permite predecir cuál es su trayectoria.

Después de haber declarado esa imposibilidad y aceptar que la naturaleza en la escala microscópica es distinta a los objetos que se describen por medio de la física clásica, hace mención a la “teoría de las variables ocultas” como una alternativa para dar cuenta de lo que sucede con los objetos microscópicos.

Para hacer alusión a ella, menciona:

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 las variables ocultas. Pero tal teoría no puede ser cierta: no es la falta de información detallada lo que nos impide hacer predicciones (Feynman, 2005, p. 161).

En el anterior fragmento, se puede observar que de manera muy concreta muestra en qué consiste la teoría de variables ocultas y hace mención de la incompletitud que es considerada por parte de esa teoría. De nuevo, no hace mención de los autores de dicha teoría, que en

principio se podría atribuir a Einstein, Podolsky y Rosen, con respecto a su artículo de 1935 y posteriormente a Bohm. Asimismo, al finalizar la descripción emite su postura un tanto decisiva respecto a dicha teoría, observándose claramente su no aceptación, pero sin alguna justificación argumentada.

Después de la rápida revisión de estos textos de divulgación, se puede observar que en todos ellos se hace alusión de esa otra interpretación que se le ha dado a la física cuántica, distinta a la Interpretación de Copenhague, y que en ella se presentó una crítica bien argumentada desde el artículo de EPR. A pesar de dicha crítica, se hace alusión a que la interpretación de Copenhague es la que resultó triunfante debido a que los resultados experimentales hechos en 1985 por el físico Alain Aspect concordaron con lo establecido por esta interpretación. Y son los propios autores de estos textos de divulgación, los que aparentemente siguen ésta interpretación.

c. Paradoja del gato de Schrödinger

También en el año de 1935, año en que se publicó EPR, Schrödinger dio a conocer su famosa paradoja del gato, conocida como “La paradoja del gato de Schrödinger”. Esta fue expuesta por primera vez dentro de su artículo “La situación actual de la mecánica cuántica”,⁴¹ que fue difundido en tres partes (Arana, 2001, p. 26). Al igual que Einstein, el físico austriaco no estaba de acuerdo con la interpretación propuesta por Bohr. Cabe destacar que por esa época, entre Schrödinger y Einstein había buena comunicación por correspondencia en la que discutían el argumento de EPR. Se ha dicho que a través de la correspondencia, Einstein sugirió a Schrödinger el planteamiento de la paradoja pero a través de otro ejemplo, el de un “barril de pólvora inestable”. Sin embargo, Schrödinger prefirió mostrarlo a través de la vida o muerte de un gato. Más adelante se describirá de qué trata dicha paradoja y sus implicaciones.

Schrödinger desde su artículo entra al debate que se generó a partir de la publicación de EPR. El físico austriaco, similar a lo propuesto en EPR, presenta a través de un experimento mental un argumento que expone la aparente inconsistencia de la mecánica cuántica (Brush,

⁴¹ “Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik”, en la revista “*Die Naturwissenschaften*”, Noviembre de 1935.

1980, pág. 419).

Sin embargo, es difícil clasificar a Schrödinger dentro de la postura que defendía Einstein o bien Bohr, ya que su pensamiento reflejado a través de sus publicaciones se trasladaba de un lado a otro, donde es perceptible una ambigüedad sin colocarse en una corriente específica. De acuerdo a Arana (2001, p. 29), Schrödinger “no acepta el ingenuo realismo de Einstein, pero tampoco el principio bohriano de complementariedad ni las evidentes pero superficiales consideraciones heisenberguerianas acerca de la interacción del sujeto y el objeto en los procesos de medición”, no obstante mantiene una desaprobación hacia la Interpretación de Copenhague.

Antes de describir en qué consiste la paradoja planteada por Schrödinger, se hará mención de su aportación a la física cuántica a través de la “función de onda” que él propuso para desarrollar las ideas de De Broglie.⁴² Su trabajo fue darle una base sólida a las ideas De Broglie, estableciendo la ecuación de la propagación de las ondas materiales en su forma más general, introduciendo el concepto de “función de onda”, que en su fórmula se representa con el símbolo Ψ .

Esta ecuación permite la descripción del comportamiento de las partículas en los átomos y reconstruir el espectro de cada átomo. En la interpretación inicialmente propuesta por Schrödinger, las partículas consistirían en ondas agrupadas en “paquetes” que parecen puntuales en nuestra escala (Ortoli, S. y Pharabod, J., 2001, p. 39), “los electrones ahora serían minúsculos paquetes formados con ondas superpuestas” (Papp, 1968, p. 138), por lo que, en la función de onda los fenómenos corpusculares y ondulatorios se reducían solamente a ondulatorios.

Con Schrödinger, el desarrollo del contenido matemático en la teoría cuántica se vuelve más complejo y podernos crear una imagen intuitiva es muy difícil, por no decir que imposible. Es interesante mencionar que a diferencia de otros físicos que participaron en el desarrollo de la física cuántica, con Schrödinger se tiene evidencia que sus intereses también se relacionaban con la filosofía, tras haber leído a Schopenhauer, Hume, Spinoza, Mach y

⁴² Con Luis De Broglie, el átomo se hace menos semejante a un sistema planetario. Inserta el movimiento ondulatorio a las órbitas de los electrones. Por lo que la onda constituye una característica general de cada partícula en conjunto con el atributo de ser corpuscular. Los dos aspectos, el corpuscular y el ondulatorio de la materia son inseparables, De Broglie tomando las ideas de Planck y Einstein, en su trabajo afirmó por primera vez la dualidad onda – corpúsculo de la luz y también de la materia.

Avenarius.⁴³

En lo que respecta al argumento que Schrödinger esbozó a través de un experimento mental, él lo desarrolla de la siguiente manera:

Un gato está encerrado en una cámara de acero, junto con el siguiente dispositivo diabólico: en un contador Geiger hay una pequeña cantidad de sustancia radiactiva, tan pequeña, que es posible que en el curso de una hora uno de los átomos se desintegre, pero también, con igual probabilidad que ninguno se desintegre, y si ocurre, el tubo contador activa el lanzamiento de un martillo que rompe un pequeño frasco de ácido cianhídrico. Si se deja todo este sistema durante una hora, se podría decir que el gato sigue viviendo mientras que ningún átomo se haya desintegrado. De lo contrario, la primera desintegración atómica habría envenenado al gato. La función de onda (Ψ) de todo el sistema podría expresar en ella al gato vivo y al gato muerto (perdón por la expresión) mezclado o repartido en partes iguales (Schrödinger, 1983).

Después de lo anterior continúa:

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).

Es en estos fragmentos en donde recae la importancia y significado de lo planteado por Schrödinger. El físico austriaco muestra lo que representa la función de onda (ψ) para la descripción de la realidad y los procesos de medida en la física cuántica, poniendo en duda la idea de que la realidad pueda ser representada de una manera imprecisa. La popularidad de la paradoja del gato de Schrödinger se observó hasta la década de 1970, ya que en los años treinta no suscitó mucho debate. A diferencia de EPR, en donde Bohr publicó otro artículo a manera de respuesta, con el artículo de Schrödinger no se generó respuesta alguna, ya que para aquellos que apoyaban la Interpretación de Copenhague no había paradoja que resolver, simplemente afirmaban que para los objetos macroscópicos no les correspondería una función de onda (Kragh, 2007, p. 210).

No obstante, al describir lo anterior en función del formalismo de la física cuántica es donde se encuentra la problemática. De manera general, tenemos que el gato es

⁴³ Tanto en sus textos titulados "Mi concepción del mundo" y "¿Qué es la vida?" (1944) se presentan varias referencias a estos filósofos.

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 significa que el gato está muerto. De acuerdo con 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 el momento en que ese abre la caja y es observado. Es en ese instante, cuando es observado, que la función de onda colapsa a ψ_v o ψ_M .

La cuestión aquí, de acuerdo a Einstein en un escrito para 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 medición [...] 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 ψ ” (Schrödinger, 1983).⁴⁴

Prosiguiendo con las exposiciones de los autores de textos de divulgación que se han retomado en este trabajo, tenemos a John Gribbin y a Robert Gilmore, quienes hacen mención de la paradoja del gato de Schrödinger. En lo que respecta a los otros textos, en ellos no se hace mención del ejemplo dado por Schrödinger en su artículo.

Dentro del texto de John Gribbin, “En busca del gato de Schrödinger”, él presenta dicha paradoja de la siguiente manera:

Einstein calificó la proposición de Schrödinger como la forma «más bonita» de mostrar el carácter incompleto de la representación ondulatoria de la materia como representación de la realidad y, junto con el argumento E.P.R., la paradoja del gato aún se discute en teoría cuántica. Por el contrario de lo que sucede con la argumentación de E.P.R., no obstante, esta paradoja no ha sido resuelta de forma satisfactoria para todos. (Gribbin, J., 1986, p. 180)

Después de esto, Gribbin prosigue con describir rápidamente en qué consiste el experimento imaginado del gato. Su descripción está dada con algunas variaciones a la exposición dada por Schrödinger en su artículo sin perder la esencia, es decir, mostrar una superposición de estados del gato mientras no se realice alguna observación. Al tener en cuenta al gato, hace ver la peculiaridad de ello, ya que una cosa es considerar a las partículas

⁴⁴ Fragmento traducido por Juan Arana en “Schrödinger. La nueva mecánica ondulatoria y otros escritos”.

en estados superpuestos y otra muy distinta es considerar a un objeto macroscópico, el gato, en un estado superpuesto, idea que está en contra de la intuición. Para exponer lo anterior lo escribe de la siguiente manera:

El experimento entero, con el gato y los demás componentes, está basado en la regla de que la superposición es real hasta que se observa, y que únicamente en el instante de dicha observación la función de onda se colapsa en uno de los dos estados [...] Una cosa es imaginar una partícula elemental, como el electrón, no estando ni aquí ni allí, sino en cierta superposición de estados, y otra mucho más dura es imaginar algo tan familiar como un gato en esta forma de muerte aparente (Gribbin, J., 1986, p. 182).

Además de mostrar estas implicaciones de dicho experimento, Gribbin manifiesta que las discusiones que se han generado a partir de dicho experimento han llevado a darle otros significados implícitos. Mencionando que hay quienes consideran que el problema anterior descrito no existe, ya que el “gato está en condiciones de resolver por sí mismo si está muerto o vivo, y la consciencia del gato es suficiente para provocar el colapso de la función de onda”. Asimismo, hace alusión a los físicos Wigner y John Wheeler quienes extrapolan el experimento de Schrödinger, considerando como posible la idea de que “si se hace una regresión infinita de causa y efecto, el universo entero puede deber su existencia real únicamente al hecho de ser observado por seres inteligentes”.

Considerando lo anterior, se observa que el texto de Gribbin no solamente se centra en dar una descripción de lo que consistió el experimento del gato de Schrödinger, sino que considera otras interpretaciones que se han creado a partir de dicho experimento. Interpretaciones, que parecieran ir más allá de las problemáticas que se plantearon en los inicios de la física cuántica.

Pasemos ahora al cuento de *Alicia en el país de los cuantos* de Robert Gilmore. Ahí también se hace alusión al gato de Schrödinger, pero de una manera más sucinta. Al igual que Gribbin, describe en qué consiste el experimento mental con algunas variaciones a las que dio el propio Schrödinger, finalizando la descripción con la supuesta pregunta que Schrödinger se planteaba ¿Cuál era el estado del gato antes de abrir la caja?

Es importante destacar, que antes de la descripción del experimento dada por el personaje del profesor de mecánica cuántica, Alicia se había encontrado con un gato con aspecto extraño, llamado precisamente “El gato de Schrödinger”. Ella lo había visto dormido y a la vez

despierto, situación que provocaba confusión a la niña.

Alicia pudo ver que, junto a la ligeramente borrosa figura del gato levantado con el lomo arqueado sobre la cesta, resultaba que había otro gato idéntico que todavía estaba echado en el fondo de ésta. Estaba muy rígido y quieto y descansaba en una posición muy poco natural (Gilmore, 2011, p. 83).

De acuerdo al profesor, el gato seguía una regla establecida en el mundo cuántico, la cual decía que “no hay manera de decir lo que hace cada partícula hasta que se le observa”. La razón de esto se debía a que eso que se observa “pudo haber sucedido de varios modos, entonces se tiene una amplitud para cada uno de los modos, y la amplitud total viene dada por la suma de sus amplitudes”. Es esta frase mencionada por el profesor, es la que hace alusión a la idea de “superposición de estados”, y para aclarar esta idea, continua exponiéndole a Alicia:

En cierto sentido, la partícula hace todo lo que tendría la posibilidad de hacer. No es simplemente que no se *sabe* lo que hace la partícula. La interferencia muestra que todas las posibilidades están presentes e influyen unas en otras. De algún modo todas ellas son reales. Todo lo que no está prohibido es obligatorio [...] Donde hay varias cosas que podrían suceder, todas suceden (Gilmore, 2011, p. 82).

De esta manera, Gilmore hace alusión al planteamiento dado por Schrödinger en su famosa paradoja del “gato de Schrödinger”, advirtiendo que la “superposición de estados” es una característica fundamental del mundo cuántico. Al igual que las partículas, el gato podría presentar esos estados superpuestos, razón por la cual parecía difuso y difícil de distinguir.

Es importante señalar que el autor hace referencia a la característica de superposición en el capítulo titulado “La escuela de Copenhague”, posterior del encuentro de Alicia con el gato. Parte de este capítulo ya fue descrito en este texto en la sección de “Interpretación de Copenhague”, cuando Alicia se encuentra en un bosque y toma todos los caminos a la vez que se encuentran frente a ella, colocando a Alicia en una superposición de estados. Cuando por fin es observada por los alumnos de la “escuela de Copenhague” ella sobreviene en un lugar, en el aula donde se encuentran dichos alumnos.

Conclusiones

Para la elaboración del presente trabajo, se buscó en primera instancia mostrar cómo en la comunicación de la ciencia se pretende establecer un vínculo entre los especialistas en ciencia y la población que no está relacionada con el contenido científico, implicando así, su desapego con el lenguaje científico. En este sentido, hay que tener claro que el público no especialista será aquel que muestre un interés por el conocimiento, reduciendo así el espectro de la población en general.

Asimismo, se presentó que el objetivo de la comunicación de la ciencia no sólo recae en la acción de informar, sino que también se busca la formación de una cultura científica. Esta última concepción, tiene que ver con considerar a la ciencia como un bien público que puede ser utilizado para aumentar el bienestar social. Es decir, crear una relación entre la ciencia y la sociedad, estimando, por una parte, las responsabilidades del científico con la sociedad, así como fomentar de alguna manera la inclusión de la sociedad en las investigaciones científicas, siendo la comunicación de la ciencia una herramienta que permite entretener a los grupos científicos con la sociedad.⁴⁵

Considerando lo anterior, se puede decir que una de las prácticas de los científicos es el de la comunicación de la ciencia, acción que va más allá de la comunicación de las investigaciones dentro de un círculo que corresponde a los propios investigadores, esto último reconocido como “difusión”, sino que dicha comunicación se puede expandir a aquellas personas que no tienen el conocimiento especializado, tarea que se denomina divulgación. La divulgación se ve reflejada en los textos que se eligieron para el desarrollo del presente trabajo de

⁴⁵ Esto dicho de manera muy general. Para ahondar en la temática de “cultura científica” se puede consultar a Vaccarezza, L.S. (2008). “Exploraciones en torno al concepto de cultura científica”. En FECYT, *Resúmenes del Congreso Iberoamericano de Ciudadanía y Políticas de Ciencia y Tecnología*. Madrid. Sin embargo, sobre esta temática existen otras fuentes para ser consultadas.

investigación, ya que los autores de estos textos son los propios físicos preocupados por difundir la teoría más allá de la población de especialistas.

En lo que refiere a los autores de dichos textos, se puede abrir un eje de investigación para reconocer el contexto en el que se realizó el trabajo de divulgación. En dicha línea de investigación se tendrían que tomar en cuenta los motivos por los cuales cada autor decide expresar contenido científico para quienes no están relacionados con él, así mismo, se podrían considerar otros factores de contexto, como factores sociales, políticos, económicos, entre otros. En este trabajo, no se desarrollaron dichos elementos, sin embargo, se presentó algún tipo de información relacionado con esta línea, ya que este contenido complementa, en cierta manera, la argumentación aquí presentada referente a los objetivos que se expresan al hacer divulgación de física cuántica. No obstante, es importante señalar que para expandir la presente investigación, son estas características las que son convenientes tomar en cuenta para obtener una apreciación más global de lo que son los trabajos de divulgación científica.

Continuando con la idea de la cultura científica, en los últimos años al observarse cómo la ciencia es parte de la cultura, se puede aludir al caso de la física cuántica. La cual está presente en los fundamentos del avance tecnológico que se ha percibido en los últimos años, situación que ha alcanzado a la vida cotidiana. Ejemplo de la tecnología que se ha desarrollado a partir del avance en la cuántica, como ya se mencionó dentro del texto, encontramos: los láser, los microcircuitos presentes en las computadoras, transistores en los aparatos electrónicos, GPS, los aparatos desarrolladas en el sector salud para diagnóstico por medio de resonancia magnética, la robótica. Dicha situación es la que se considera como una de las motivaciones por las que se presenta la teoría cuántica a la población, esto para hacer notar que en dicha tecnología hay principios científicos que pueden interesar a la sociedad. Es decir, se intenta crear un puente informativo entre ciencia y tecnología.

Por otro lado, otra de las circunstancias a las que se le alude la importancia de promover a la física cuántica, es que ella está presente en los fundamentos de los cambios conceptuales que se han dado para describir la naturaleza, en este sentido, para describir los objetos que están en el mundo microfísico, cuya búsqueda por su entendimiento ha propiciado una nueva

representación de cómo actúa la naturaleza a esas escalas.

Es pues, estos cambios conceptuales que se dieron a partir del desarrollo de la física cuántica que propicio que ella este conformada por su propio sistema conceptual. Es decir, ese sistema conceptual difiere de las teorías que actualmente se consideran como teorías de la física clásica. Es esta distinción la representa la particularidad de representar a la nueva física.

Ahora bien, para hacer representaciones de la física cuántica dirigidas a la población que carece del conocimiento especializado, la teoría sufre algunos ajustes para ser comunicada. Estos ajustes se dan en el lenguaje empleado en la comunicación, de esta manera, las representaciones dadas buscan ser más cercanas al lenguaje común de quienes la reciben. Es pues, en estos ajustes de lenguaje, pasando del lenguaje especializado a un lenguaje común, donde puede haber la posibilidad de pérdida de información, y a su vez, la generación de entendimiento corresponderá de acuerdo a las interpretaciones que el sujeto conciba. En este sentido, al considerar las nociones de la física cuántica que difieren de las de la física clásica, las cuales estas últimas están más relacionadas con el sentimiento de intuición para comprender los fenómenos físicos que suceden “en la cotidianidad”, se puede presentar una impresión de contradicción hacia la misma intuición. Es en ello en donde radica una de las dificultades de comunicar esta ciencia.

La elección de la física cuántica, fue precisamente por las ideas anti-intuitivas que ella presenta dentro de sus fundamentos teóricos, ideas que a la vez han implicado cuestiones filosóficas. De considerar lo anterior, en la comunicación de esta ciencia también se deberían observar estas problemáticas que la propia teoría contiene, además de considerar las propias dificultades que en la comunicación se presentan.

Una de las problemáticas que puede surgir en toda comunicación de la ciencia, y en particular de la divulgación, es que en la comunicación científica, al utilizar un lenguaje natural se pueden presentar las mismas problemáticas semánticas del lenguaje. Esto es, que puedan surgir casos de sinonimia, polisemia, cambios de significado, reinterpretación, etc.

Otro de los puntos a considerar al crear divulgación de la ciencia, es que el público es tan heterogéneo que la manera en que el público asume la información podrá depender de variantes un tanto personales; como expectativas y motivaciones, más que del propio discurso en sí.

Por otro lado, uno de los riesgos existentes en los textos de divulgación, en específico, con la física cuántica, es la difusión de pseudociencia. Es decir, que dichos textos se basen en terminología propia de la cuántica para presentar argumentos carentes de verificación pero que, en primera instancia parezcan plausibles.

Ahora bien, considerando los textos de divulgación utilizados en este trabajo⁴⁶, se ha percibido que se busca conseguir que el público que no está relacionado con el contenido científico, acceda a una parte de dicho contenido y de esta manera comprenda los argumentos expuestos, requiriendo que el lenguaje especializado sea reelaborado con la ayuda de herramientas discursivas para la divulgación. Por mencionar algunas de estas herramientas, se encuentra el uso de definiciones, ejemplificaciones, el uso de secuencias narrativas, la metáfora y analogía, escenificaciones, expresiones valorativas por parte del autor, así como también el uso de lenguaje poético, cuya finalidad es hacer que los mensajes resulten atractivos.

Es pues, a través del uso de dichas herramientas y prescindiendo del lenguaje especializado, que los problemas conceptuales de la física cuántica se pueden describir sin necesidad de recurrir a los detalles técnicos de la teoría. Además, otra característica que hay que resaltar de los textos divulgativos, es que en ellos no hay que cumplir con un orden canónico neutral, tal como se presenta en los artículos académicos, sino que permite expresar interrogaciones y admiraciones, además de hacer cambios de orden en las palabras para enfatizar y focalizar el interés.

⁴⁶ Aunque no necesariamente esta idea se pueda limitar a los textos aquí expuestos, sino que se puede extrapolar a todos aquellos textos elaborados con una finalidad de divulgación.

El carácter técnico del vocabulario no desaparece del todo, ya que se mantiene una selección de términos que van a convertir el conocimiento restringido a un sector limitado, en un conocimiento general.

Al tener en cuenta los textos seleccionados, y presuponiendo que el objetivo principal de ellos es suscitar un entendimiento general de las características esenciales de la teoría cuántica, se debe tener en cuenta cómo fue el lenguaje utilizado. En este sentido se puede decir que un lenguaje a manera de narración y prescindiendo del lenguaje técnico en la mayor medida posible, puede resultar más atractivo para el lector, siempre y cuando la historia vaya cumpliendo con orden y ritmo.

De los textos elegidos, los cuentos de George Gamow y el cuento de Robert Gilmore, presentan este tipo de historias. Considerando esto, y haciendo un primer juicio de valor, se podría afirmar que el entendimiento de algunos conceptos es posible en los lectores. Sin embargo, para valorar si el objetivo es logrado en un sentido más fundamentado, sería oportuno realizar un ejercicio de comprensión de dichas lecturas.

En lo que respecta a las conferencias realizadas por Feynman, hay que tomar en cuenta el público para el que fueron realizadas. Esto es, para estudiantes principiantes en física y después publicadas para un público más amplio. Considerando el primer público, se observa que el lenguaje utilizado en dichas conferencias es especializado. Esta característica es la que puede influir en la manera de comprender las nociones, así como también afectar en la conservación de la atención del lector. No obstante, como se mencionó atrás, para reconocer esto, se podría realizar algún ejercicio de comprensión.

Otro punto a considerar dentro de los textos elegidos, es el papel que juegan las condiciones que propiciaron el desarrollo de la teoría, es decir, el contexto en el que se generó la cuántica. Tal parece que, de los textos elegidos, fue John Gribbin el que desarrolló ampliamente las temáticas, por considerar aspectos históricos de los científicos que fueron estableciendo la teoría. En este sentido, en el texto de Robert Gilmore no se presentan las circunstancias que jugaron un papel importante en la evolución de la teoría, sino que, en su

narración, a través de la aventura de Alicia, se van presentando eventos que representan ciertas características representativas del comportamiento de los objetos cuánticos. De esta misma manera, los cuentos de Gamow, en su mayoría describen cómo es el comportamiento de los objetos en un mundo cuántico, esto último dentro de las narraciones de los sueños del Sr. Tompkins. Sin embargo, en algunas exposiciones dadas por el personaje del profesor de física, ahí si se hace mención de algunos antecedentes que propiciaron la formación de la teoría cuántica.

Por otra parte, haciendo alusión a los modelos que existen en la comunicación de la ciencia, se puede observar claramente que en los textos de divulgación elegidos, tanto el de Gribbin, Gamow y Feynman, se refleja el modelo de déficit. Este modelo indica que “existe un déficit de conocimiento que debe ser llenado, con la presunción de que después de solucionar el déficit, habrá una mejora” (Lewenstein, 2003). Así pues, en las narrativas hechas en las historias del Sr. Tompkins y en el cuento de “Alicia en el país de los cuantos, se presenta el estereotipo del científico que conoce sobre el tema y muestra sus conocimientos a aquellos que no son expertos. Esto también se hace presente en las conferencias dadas por Feynman, donde él toma el papel del experto. De esta manera, el modelo se presenta de manera lineal y jerárquica, el conocimiento se da en una sola dirección, del científico al lego, en otras palabras, los expertos enseñan y el público, como recipiente pasivo, aprende.

Aunado a la comprensión de las nociones de la física cuántica, se encuentran las problemáticas filosóficas implícitas en la teoría. Estas problemáticas, al observar los textos, muchas veces no son hechas explícitas por los autores. Sin embargo, dejan entrever que en la teoría hay situaciones que no pueden ser comprendidas intuitivamente, generando así, un desconcierto, por decirlo de alguna manera, ante el significado que se le podría dar a la teoría por buscar la descripción de los objetos microfísicos.

Por otro lado, cuando los autores hacen un citado hacia la filosofía, recurren a notificar que ciertas circunstancias están presentes en la indagación filosófica, que para fines prácticos, muchos de los físicos no se ocupan de estas circunstancias y su investigación se basa en los resultados prácticos que la teoría arroja. Ante tal situación, es notable destacar que desde los

inicios de la física cuántica ha habido preocupaciones en el sentido filosófico por parte de aquellos físicos considerados como precursores de la teoría. Entre ellos encontramos a los que han sido abordados en este trabajo: Planck, Einstein, Bohr, Schrödinger, Heisenberg y otros. Destacando que no han sido los únicos por indagar a la teoría, ya que tiempo después se fueron desarrollando otras investigaciones relacionadas con las primeras cuestiones filosóficas, entre ellos podemos mencionar a David Bohm, John S. Bell, el propio Richard Feynman, entre otros. De esta manera, no se puede despreciar la preocupación por parte de los físicos por las cuestiones filosóficas.

Bibliografía

- Albert, D. (1994). *Quantum Mechanics and Experience*. Massachusetts: Harvard University Press.
- Arana, J. (2001). Introducción. En J. Arana, *Schrödinger. La nueva mecánica ondulatoria y otros escritos*. (pp. 13-43). Madrid: Biblioteca Nueva.
- Arana, J. (2002). Causalidad y objetividad. Schrödinger y el transfondo filosófico de la física cuántica. En C. Mataix, & A. Rivadulla, *Física cuántica y realidad* (pp. 73-96). Madrid: Editorial Complutense.
- Beller, M. &. (1994). Bohr's response to EPR. En J. Faye, *Niels Bohr and Contemporary Philosophy* (pp. 1-27). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Berger, P., & Luckmann, T. (2005). *La construcción social de la realidad*. Buenos Aires: Amorrortu.
- Berruecos, M. (1995). La producción discursiva de la ciencia. *Argumentos*, pp. 93-108.
- Berruecos, M. (2002). Sobre la terminología científica: Su empleo y reformulación en el lenguaje cotidiano. *Signos Literarios y Lingüísticos*, pp. 17-28.
- Bohr, N. (1958). Discussion with Einstein on Epistemological problems in atomic Physics. En N. Bohr, *The philosophical writings of Niels Bohr. Vol II* (pp. 32-66). Connecticut: OX BOW Press.
- Bohr, N. (1970). *Nuevos ensayos sobre física atómica y conocimiento humano*. México: Aguilar.
- Bohr, N. (1988). El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría cuántica (1927). En N. Bohr, *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza* (pp. 97- 132). Alianza: Madrid.
- Bohr, N. (1988). *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza*. Alianza: Madrid.

- Bonfil, M. (2003). La tensión esencial. *No divulgaras, El muégano divulgador*, DGDC.
- Brush, S. (1980). The chimerical cat: Philosophy of Quantum Mechanics in Historical Perspective. *Social Studies of Science*, pp. 393-447.
- Cadenas, Y. (2004). *Epistemología, ontología y complementariedad en Niels Bohr*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Calsamiglia, H. (1997). Divulgar: itinerarios discursivos del saber. *Quark*.
- Calvo Hernando, M. (2003). *Divulgación y periodismo científico: Entre la claridad y la exactitud*. México: DGDC.
- Casini, P. (1971). *El universo máquina*. Barcelona: Martínez Roca.
- Cassany, D. (2000). La transformación divulgativa de redes conceptuales científicas. Hipótesis, modelo y estrategias. *Discurso y Sociedad*, pp. 73-103.
- Cazaux, D. (2010). *Historia de la divulgación científica en la Argentina*. Buenos Aires: Teseo.
- Chakravartty, A. (2011). *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Recuperado el 12 de Marzo de 2013, de <http://plato.stanford.edu/archives/sum2013/entries/scientific-realism/>
- Cirac, I. (17 de Octubre de 2012). *El país*. Recuperado el 2012 de Enero de 8, de http://sociedad.elpais.com/sociedad/2012/10/16/actualidad/1350406555_151960.html
- Clemente de la Torre, A. (2000). *Física cuántica para filósofos*. México: FCE.
- Cushing, J. T. (2003). *Philosophical concepts in physics. The historical relation between philosophy and scientific theories*. New York: Cambridge University Press.
- Del Río, F. (2003). Sobre la ciencia y su divulgación. En L. (. Estrada Martínez, *La divulgación de la ciencia ¿educación, apostolado o ...?* México: DGDC.
- Earman, J. (1986). *A primer on determinism*. Países Bajos: Reidel Publishing Company.
- Einstein, A., Podolsky, B., & Rosen, N. (2005). ¿Puede considerarse completa la descripción mecánico-cuántica de la realidad física? En J. M. Sánchez Ron, *Einstein*, pp. 507-515. Barcelona: Crítica.
- 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.

- Ferrero, M. (1988). Prólogo. En N. Bohr, *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza*, Madrid: Alianza Universidad, pp. 9-46.
- Feynman, R. (2005). Probabilidad e incertidumbre. La visión de la naturaleza a través de la mecánica cuántica. En R. Feynman, *El carácter de la ley física*. Barcelona: Tusquets, pp. 145-163.
- Feynman, R. (2007). *Seis piezas fáciles. La física explicada por un genio*. Barcelona: Drakontos bolsillo.
- Galán Rodríguez, C. (2003). La ciencia en zapatillas: Análisis del discurso de divulgación científica. *Anuario de estudios Filológicos*, pp. 137-156.
- Gamow, G. (1997). *El país de las maravillas*. México: FCE.
- Gamow, G. (2009). *El nuevo breviario del señor Tompkins*. México: FCE.
- Gamow, G. (2009b). Snooker cuántico. En G. Gamow, *El nuevo breviario del señor Tompkins* (págs. 131-158). México: FCE.
- Gamow, G. (2009c). El safari cuántico. En G. Gamow, *El nuevo breviario del Señor Tompkins* (pp. 159-171). México: FCE.
- Gilmore, R. (2011). *Alicia en el país de los cuantos. Una alegoría de la física cuántica*. Madrid: Alianza Editorial.
- Gispert, C. (2004). *Atlas universal de filosofía*. Barcelona: Oceano.
- Gribbin, J. (1986). *En busca del gato de Schrödinger. La fascinante historia de la mecánica cuántica*. Barcelona: Salvat.
- Heisenberg, W. (1927). The physical content of Quantum Kinematics and Mechanics. En J. & Wheeler, *Quantum Theory and Measurement*. Princeton: Princeton University Press, pp. 62-84.
- Heisenberg, W. (2004). *La parte y el todo. Conversando en torno a la física atómica*. Castellon: Ellago Ediciones.
- Hilgevoord, J., & Uffink, J. (2012). *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Recuperado el Enero de 2013, de Stanford Encyclopedia of Philosophy: <http://plato.stanford.edu/archives/sum2012/entries/qt-uncertainty/>
- Jammer, M. (1966). *The conceptual development of quantum mechanics*. New York: McGraw Hill.

- Jammer, M. (1974). *The philosophy of Quantum Mechanics: The interpretations of QM in historical perspective*. New York: Wiley-Interscience.
- Jou, D. (2002). *Quark. Ciencia, Medicina, Comunicación y Cultura*. Recuperado el 28 de 01 de 2013, de <http://quark.prbb.org/26/default.htm>
- Kragh, H. (2007). *Generaciones cuánticas. Una historia de la física en el siglo XX*. Madrid: Akal.
- Laplace, P. S. (1988). *Ensayo filosófico sobre las probabilidades*. México: Alianza.
- Lewenstein, B. (2003). Models of public communication of science and technology. *Public Understanding of Science*, 11.
- Macfarlane, R. (28 de Septiembre de 2002). *Proquest*. Recuperado el 28 de Octubre de 2012, de <http://search.proquest.com/docview/201232415?accountid=14598>
- Navarro Faus, J. (2011). *Los caminos cuánticos. Feynman*. Madrid: Nivola.
- Navarro, O. (2010). El surgimiento de la complementariedad: Niels Bohr y la Conferencia de Como. *Revista Filosofía Universidad Costa Rica*, 65-76.
- Olivé, L. (2000). *El bien, el mal y la razón. Facetas de la ciencia y la tecnología*. México: Paidós.
- Ortoli, S. y Pharabod, J. (2001). *El cantico de la cuántica ¿Existe el mundo?* Barcelona: Gedisa.
- Papp, D. (1968). *La doble faz del mundo físico*. Madrid: Espasa-Calpe.
- Rae, A. (1998). *Física cuántica ¿Ilusión o realidad?* Madrid: Alianza Editorial.
- Reichenbach, H. (1996). *Objetivos y métodos del conocimiento científico*. México: FCE.
- Rioja, A. (1992). La filosofía de la complementariedad y la descripción objetiva de la naturaleza. *Revista de filosofía. 3ra. época*, pp. 257-282.
- Rioja, A. (2002). Sobre ondas y corpúsculos: Un punto de vista lingüístico. En C. & Mataix, *Física cuántica y realidad*. Madrid: Editorial Complutense. pp. 135-153.
- Sánchez Mora, A. M. (2002). El bestiario de los divulgadores. En J. Tonda, A. Sánchez, & N. Chávez, *Antología de la divulgación de la ciencia en México*. Méxio: DGDC. pp. 302-308.
- Sánchez Mora, A. M. (2011). *La divulgación de la ciencia como literatura*. México: DGDC.

- Sánchez Ruiz, J. (2002). Información, incertidumbre y complementariedad. En C. & Mataix, *Física cuántica y realidad*. Madrid: Editorial Complutense. pp. 267-283.
- Schilpp, P.A. (1968). *Albert Einstein: Philosopher - Scientist*. New York: MJF Books.
- Schrödinger, E. (1983). The present situation in Quantum Mechanics: A translation of Schrödinger's "cat paradox". En J. Z. Wheeler, *Quantum Theory and Measurement* (págs. 152-167). Princeton University Press. pp. 152-167.
- Selleri, F. (1986). *El debate de la teoría cuántica*. Madrid: Alianza.
- Shapere, D. (1982). The concept of observation in science and philosophy. *Philosophy of Science*, pp. 485-525.
- Snow, C. (1961). *The two cultures and the scientific revolution*. New York: Cambridge University Press.
- Thagard, P. (1992). *Conceptual Revolutions*. Princeton University Press: New Jersey.