



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

1 8 0 3

Facultad de Educación

A propósito de la dualidad onda – partícula: una re-significación conceptual
desde los planteamientos de Louis de Broglie

Tesis presentada para obtener el título de
Licenciado en Matemáticas y Física

David Santiago Angarita Posada

Juan David Pino Sánchez

Asesor:

Yirsén Aguilar

Universidad de Antioquia

Facultad de Educación

Departamento de enseñanza de las ciencias y las artes

Junio 2016

Resumen

Un número considerable de investigaciones (Ostermann, 2000; Gil y Solbes, 1986; Fischler y Lichtfeldt, 1992; Arons, 1990), señalan serios problemas en la enseñanza de la física moderna. Estos autores resaltan que en la enseñanza de la física se desconoce el carácter no lineal del desarrollo científico y, en consecuencia, no se tienen en cuenta las dificultades que tal linealidad genera en la comprensión de las dinámicas científicas y, desde luego, en la postulación del conocimiento mismo. Esta situación pareciera inducir a que tampoco se reflexione acerca de las profundas diferencias conceptuales existentes entre la física clásica y la física moderna.

En el caso particular de la dualidad onda-partícula, en algunos textos universitarios (Serway, 2005; Reese, 2002; Resnik, 2005), se observa un privilegio de la perspectiva clásica y ondulatoria de la luz, cuando se intentan resolver las situaciones físicas que involucran este fenómeno, perspectiva que resulta insuficiente para comprender problemas actuales y que son propios de la Física.

Se plantea entonces que a estas maneras de significar y de enseñar estos conceptos, subyace un modo particular de asumir la Ciencia y la enseñanza, y en tal sentido, se adelanta un análisis histórico y epistemológico de la perspectiva Louis De Broglie, por considerar que su particular manera de abordar y formalizar el fenómeno de la luz en su obra titulada: *Recherches sur la théorie des quanta* (1924), permite, no solo explicitar maneras de hacer ciencia sino que, además, puede ser de vital importancia para resignificar la dualidad onda – partícula y justificar el planteamiento de una visión

simultanea de las propiedades ondulatorias y corpusculares de la luz. En este sentido, se estima que esto posibilite un abordaje integral del fenómeno de la luz mediante la dualidad onda – partícula, concepto que constituye un punto de inflexión entre la teoría cuántica y la teoría clásica. Al respecto, conviene resaltar que Louis De Broglie (1924) el que considera, por primera vez, la posibilidad de establecer las propiedades ondulatorias del electrón, que hasta ese entonces era considerado totalmente como una partícula.

Finalmente, se plantean unas implicaciones didácticas que surgen como producto del análisis de la perspectiva Louis De Broglie (1924) y de los datos obtenidos con la aplicación de algunos instrumentos a cuatro casos de la Universidad de Antioquia.



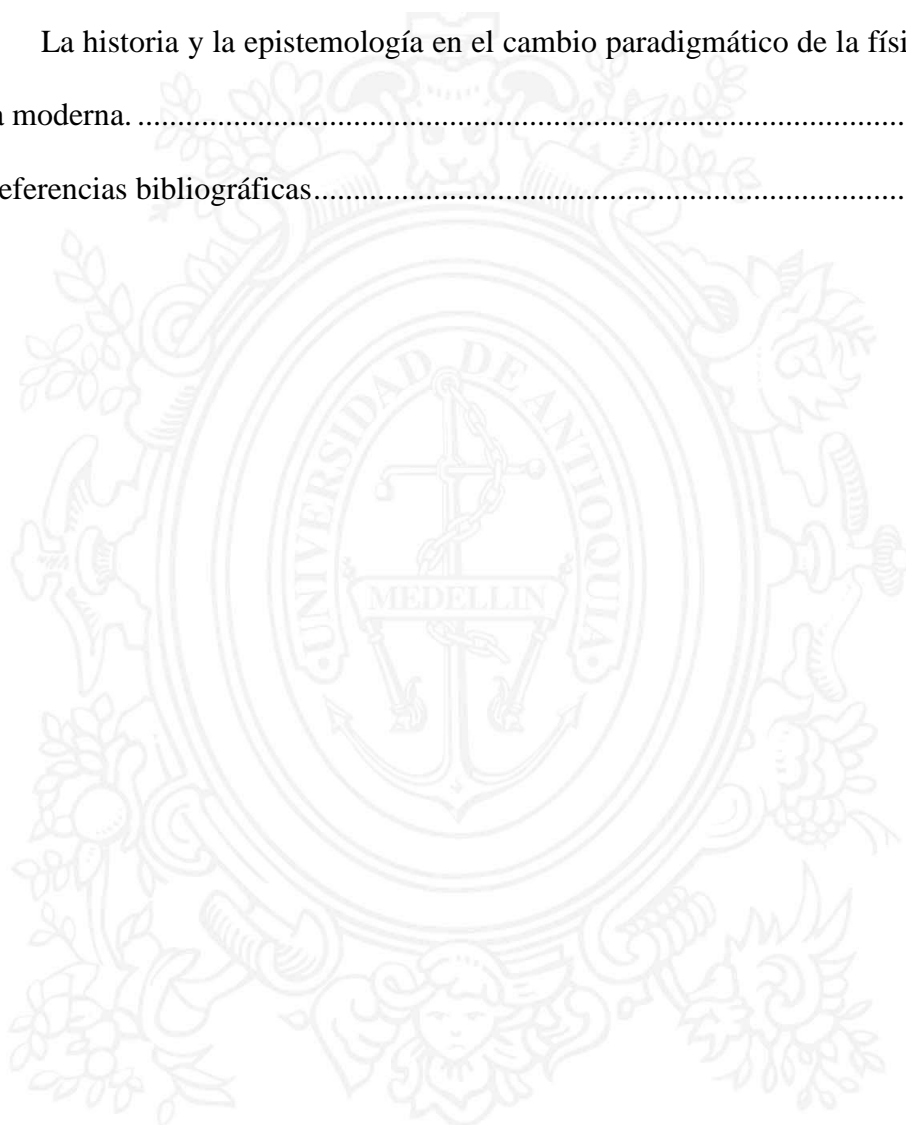
Tabla de Contenidos

| | |
|--|----------|
| Tabla de Contenidos..... | iv |
| Tabla de ilustraciones | 7 |
| Lista de tablas..... | 7 |
| Capítulo 1. Contextualización..... | 8 |
| 1.1. Planteamiento del problema..... | 8 |
| 1.2. Objetivos | 14 |
| 1.2.1. Objetivo General..... | 14 |
| 1.2.2. Objetivos específicos..... | 14 |
| Capítulo 2. Marco Teórico..... | 15 |
| 2.1. Contextualización Histórica..... | 16 |
| 2.2. Uso de la historia y la epistemología en la enseñanza de las ciencias | 19 |
| 2.3. Re-significación de la dualidad onda – partícula a través de los planteamientos de Louis de Broglie..... | 23 |
| 2.3.1. Dualidad Onda - Partícula..... | 24 |
| 2.3.1.2 Propiedades corpusculares de la radiación electromagnética..... | 25 |
| 2.3.1.3. Propiedades ondulatorias de los cuerpos..... | 27 |
| 2.3.2. Precisiones conceptuales desde la perspectiva de Louis de Broglie..... | 30 |
| Capítulo 3. Metodología..... | 33 |
| 3.1. Enfoque y Método..... | 33 |

| | |
|--|----|
| 3.2. Contexto e informantes de la investigación | 34 |
| 3.3. Fases de la investigación | 36 |
| 3.4. Recolección y análisis de los datos | 37 |
| 3.4.1. Recolección de los datos. | 37 |
| 3.4.2. Análisis de los datos. | 42 |
| Capítulo 4. Hallazgos | 45 |
| 4.1. La luz como onda | 46 |
| 4.2. La luz como partículas | 50 |
| 4.3. La luz con comportamiento dual | 53 |
| 4.4. La materia desde una perspectiva clásica y mecanicista | 56 |
| 4.5. La materia desde una perspectiva moderna y dual | 58 |
| 4.6. La propagación de la luz en el espacio no refleja comportamientos de onda ni de partícula, solo de rayos de luz. | 60 |
| Capítulo 5. Implicaciones didácticas | 61 |
| 5.1. Secuencia Didáctica | 63 |
| 5.1.1. Pregunta central. | 63 |
| 5.1.2. Fase de indagación. | 64 |
| 5.1.3. Introducción de nuevos modelos explicativos | 70 |
| 5.1.4. Estructuración de nuevos conocimientos | 75 |
| 5.1.5. Aplicación a nuevas situaciones problema | 76 |
| Capítulo 6. Consideraciones finales | 81 |



| | |
|---|----|
| 6.1. La historia y la epistemología en el cambio paradigmático de la física clásica a física moderna..... | 88 |
| 7. Referencias bibliográficas..... | 92 |



UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA

1 8 0 3



Tabla de ilustraciones

| | |
|---|----|
| Ilustración 1, Tomada de: El enigma cuántico (Rosenblum & Kuttner, 2010). | 26 |
| Ilustración 2, Tomada de: Feynman, (1971)..... | 28 |
| Ilustración 3, Tomada de: Feynman, (1971)..... | 29 |
| Ilustración 4, Tomada de: Feynman, (1971)..... | 30 |
| Ilustración 5, (Informante 1)..... | 49 |
| Ilustración 6, (Informante 1)..... | 55 |
| Ilustración 7, (Informante 1)..... | 56 |

Lista de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1, Categorías apriorísticas y emergentes..... | 44 |
|---|----|

UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA

1 8 0 3

Capítulo 1. Contextualización

1.1. Planteamiento del problema

En el estudio del fenómeno de la luz, han influido una gran cantidad de personajes, entre otros como Newton, Maxwell, Young, Huygens, Planck, los cuales tuvieron diferentes puntos de vista sobre los fenómenos de la luz. Entre estos puntos de vista, los más estudiados han sido la teoría ondulatoria y la teoría corpuscular de la luz, las cuales, en sus inicios eran consideradas como contradictorias, pero por los cambios acaecidos en la forma de asumir el conocimiento y la ciencia misma, ahora se concibe la luz como un ente con comportamiento dual, donde ondas y partículas coexisten en lo que se denomina dualidad onda – partícula.

De esta manera, la preocupación deja de centrarse en la naturaleza de la luz, en el sentido de que: “la luz es luz, esto es seguro, pero la pregunta (¿se trata de una onda o una partícula?) Es inapropiada, a veces la luz actúa como onda y otras veces como partícula” (Serway, 2005) de aquí que la luz es entendida desde dos puntos de vista. El problema entonces recae en asumir su comportamiento dual sin tener en cuenta las condiciones históricas y epistemológicas del concepto mismo y el cambio paradigmático implícito en este. No entender las implicaciones que llevaron a generar una teoría dual de la luz, pueden traer dificultades en su enseñanza.

En este texto, se comenzará mostrando la importancia de la enseñanza de este concepto en las aulas de clase, luego, se realiza una descripción de los problemas que se

evidencian en la enseñanza de la naturaleza dual de la luz, mediante el planteamiento de algunos autores que se consideran pertinentes, precisándolos en tres problemas fundamentales, los cuales motivan la formulación del tema objeto de investigación. En el análisis realizado se logran precisar ciertos problemas que se evidencian en la historia de las ciencias y que aún son vigentes en el contexto de la enseñanza. Al respecto, algunos autores señalan la importancia de abordar no sólo la física clásica, sino también la física moderna, de modo que se puedan mostrar los cambios de paradigma que permiten ilustrar las dinámicas de producción del conocimiento científico, como una tentativa de la llamada realidad y que claramente no tiene un carácter lineal. Complementario a lo anterior, didactas de la ciencia como Ostermann, (2000), plantean algunas razones que justifican la introducción de la física moderna en la secundaria, entre las que se destacan:

- Despertar la curiosidad de los alumnos.
- Volver la ciencia cercana a ellos, al entenderla como una construcción humana.
- Formar a los futuros investigadores en la física.
- El acercamiento que tienen los estudiantes a la física moderna a través de programas de televisión o películas.
- Investigaciones que han mostrado que la física clásica llega a ser igual de abstracta que la física cuántica.

- La enseñanza de temas actuales de la física puede contribuir a una visión más concreta de la ciencia que trasciende a la de los libros de texto.
- El creciente número de aparatos tecnológicos basados en la física cuántica que invaden nuestra vida cotidiana.

Este autor realiza una descripción de las prácticas usuales en la enseñanza de la física moderna, describe tres líneas en las cuales se mueven los maestros de física a la hora de enseñar estas temáticas, la primera línea surge de la exploración de los límites clásicos, basada en los trabajos de Gil y Solbes (1986) en la cual se evidencia que los libros didácticos de física no hacen ninguna referencia a los siguientes temas: a) el carácter no lineal del desarrollo científico; b) las dificultades que generaron las crisis de la física clásica; c) las profundas diferencias conceptuales entre la física clásica y la física moderna.

La segunda línea (Fischler, Lichtfeldt, 1992) considera las dificultades que se presentan al introducir analogías clásicas en la enseñanza de la física cuántica, esta línea es opuesta a la anterior y considera que la física cuántica se debe enseñar desde cero.

La tercera línea (Arons, 1990) propone que sólo unos pocos conceptos de física cuántica deben ser enseñados en la escuela media. Arons (1990) defiende el uso de conceptos clásicos para abordar los tópicos modernos y contemporáneos, de forma que, según él, a partir de dichos conceptos son construidas las teorías modernas y

contemporáneas, con el supuesto fin de que estas sean más comprensibles para los estudiantes.

En la tercera línea se encuentra que, a partir de los conceptos clásicos se comienza el desarrollo de la física moderna, privilegiando también esta concepción, sin mostrar el cambio de paradigma que dio origen al estudio de la física moderna, pues como se ha mostrado anteriormente, la física cuántica constituye un cambio de paradigma y un cambio de nuestra visión del mundo.

Es así como en la mayoría de formas de enseñanza de la física moderna, más específicamente en la primera y tercera línea se privilegian una mirada clásica de las ciencias, haciendo ver al estudiante un carácter lineal del desarrollo de la física y en consecuencia, los estudiantes no logran comprender que estas (la perspectiva clásica y la moderna) son dos miradas completamente distintas de la realidad y por lo tanto no comparables.

Así, se evidencia que existe un consenso general sobre la necesidad de introducir la física moderna en la secundaria (Sinarcas, 2013) temas que vistos bajo los anteriores perspectivas, cobran relevancia en la construcción y planeación de las clases de física; no obstante, cuando se intenta enseñar la física moderna surgen problemas como la comprensión de la dualidad onda – partícula.

En el intento de realizar algunas precisiones, se logra establecer que se le llama dualidad onda-partícula a aquella ideología flexible, capaz de justificar una variedad de

razonamientos sobre ondas y corpúsculos, que revelan de manera satisfactoria la fusión entre entidades corpusculares y ondulatorias (Segura, 2012); En esta definición se ve como los puntos de vista clásicos y modernos se encuentran para explicar un solo fenómeno; además de generar un punto de inflexión entre ambas teorías, donde se hacen evidentes sus similitudes y diferencias. Por otro lado, el fenómeno dualidad onda - partícula permite evidenciar un proceso de conocimiento de la naturaleza, generando un cambio radical en nuestras concepciones y formas de observar el mundo (Segura, 2012).

En los libros de texto universitarios, utilizados para la formación de docentes, Serway (2005), Reese (2002), Resnik (2005) y Sears (2004), observamos que, generalmente en la sección de la luz, se describen los fenómenos ondulatorios desde una perspectiva clásica, propia del siglo XIX, en la que se destacan, entre otras, cuestiones como: refracción, interferencia, difracción, polarización. En este tratamiento no se tiene en cuenta la perspectiva moderna de la luz o su comportamiento dual. Cuando se abordan los temas de cuántica, como el efecto fotoeléctrico, la luz solo es significada como partícula, no se precisa sobre su naturaleza, situación que induce a que el estudiante cree modelos explicativos clásicos en torno a la luz, entendiendo la luz desde una naturaleza ondulatoria; lo cual no es del todo malo, aunque sería algo incompleto ya que la luz atiende a un comportamiento dual tanto de onda como de partícula.

Los modelos explicativos clásicos riñen con los modelos cuánticos: ya que por una parte, el estudiante cree que existen dos tipos de luz una que se comporta como onda y otra que posee propiedades corpusculares, esta forma de abordar los problemas de la

física, perpetúa en la tradicional manera de considerar una única forma de ver los fenómenos físicos y en consecuencia a pensar en una única manera de conocer y en una verdad absoluta. Tal como se ha planteado, en la enseñanza de la física cuántica y específicamente, en la enseñanza de la dualidad onda – partícula, se privilegia la mirada clásica en la que el uso de analogías, hace que los estudiantes se confundan en torno a la dualidad onda – partícula, por ejemplo, los estudiantes no son capaces de comprender que los electrones, fotones, etc, no son ni ondas ni partículas, sino objetos nuevos con un comportamiento nuevo, el cuántico (Levy-Leblond, 2003), además, muchos estudiantes comprenden el fenómeno como una suma de efectos de partícula y de onda (Greca & Herscovitz, 2002).

Es así como el estudiante en el intento de entender estos nuevos conceptos, entran en el dilema de confrontar las posturas de la física clásica con la física moderna , además, una causa importante de la persistencia de las dificultades conceptuales es el hecho de que los modelos didácticos utilizados habitualmente por el profesorado - transmisión verbal de conocimientos ya elaborados o descubrimiento inductivo y autónomo (Gil et al, 1986)- no tengan en cuenta las estructuras conceptuales previas de los alumnos en las que los nuevos conocimientos han de integrarse o, a menudo, contra las que han de construirse (Solbes, Calatayud, Climent, & Navarro, 1987).

En resumen, el problema fundamental que radica en la enseñanza de la dualidad onda partícula, pues en primera instancia, los profesores no toman en cuenta el cambio paradigmático implícito en dicho concepto, en segundo lugar, los docentes y libros de

texto privilegian la mirada clásica frente al punto de vista moderno y dual, y por último, no se enseñan simultáneamente las teorías clásicas y modernas implícitas en la dualidad onda – partícula, lo cual permitiría ilustrar las dinámicas de producción del conocimiento científico y el carácter no lineal de este.

Así se llega a la pregunta ¿cómo resignificar, en el contexto de la enseñanza el fenómeno de la luz desde los planteamientos Louis-Victor de Broglie, que permitan precisiones conceptuales en un enfoque integral de la dualidad onda partícula?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General.

Resignificar, en el contexto de la enseñanza el fenómeno de la luz desde los planteamientos Louis-Victor de Broglie, que permitan precisiones conceptuales en un enfoque integral de la dualidad onda- partícula.

1.2.2. Objetivos específicos.

- Analizar la dualidad onda-partícula desde los planteamientos de Louis-Victor de Broglie en su obra *Recherches sur la théorie des quanta*, para realizar precisiones conceptuales de la dualidad-partícula vía a un enfoque integral del fenómeno de la luz.
- Caracterizar los modelos explicativos de 4 casos del programa de licenciatura en matemáticas y física, sobre la dualidad onda-partícula.

- Resignificar la dualidad onda-partícula a partir de los planteamientos del teórico y los cuatro casos en una secuencia didáctica, en la que se establece precisiones conceptuales para un enfoque integral del fenómeno de la luz.

Capítulo 2. Marco Teórico

Retomando los tres problemas fundamentales de esta investigación, se encuentra inicialmente que los profesores no toman en cuenta el cambio paradigmático implícito en dicho concepto, en segundo lugar, los docentes y libros de texto privilegian la mirada clásica frente al punto de vista moderno y dual, y por último, no se enseñan simultáneamente las teorías clásicas y modernas implícitas en la dualidad onda – partícula, se plantean tres ejes teóricos para dar respuesta a estos problemas.

El primer eje teórico es una contextualización histórica, en la cual se evidencia el cambio de paradigma implícito en la dualidad onda – partícula, para esto se hace un análisis de los puntos críticos de la construcción de la teoría moderna de la luz. En el segundo eje teórico se examina la relación historia, epistemología y enseñanza, donde se plantean argumentos que señalan los aportes de la historia y la epistemología en la solución y análisis de los problemas de la enseñanza de estos conceptos. Por último, se plantea una la re-significación de la dualidad onda – partícula, a partir de los planteamientos de Louis de Broglie, expuestos en su obra investigaciones sobre la teoría de los cuantos.

2.1. Contextualización Histórica

En este apartado, se inicia con el análisis de algunos factores históricos que son de gran importancia para poner al lector en contexto con las situaciones claves que originaron la construcción de un comportamiento dual de la luz. Se presenta un estado de la discusión entre los siglos XVII y XX, al considerar que a lo largo de estos siglos se evidencia la ruptura histórica existente entre la corriente clásica que comprende a la luz como una onda y, la moderna que plantea la luz como partículas en el espacio.

Sobre estos asuntos, algunos investigadores (De Broglie, 1927; Levy-Leblond, 2003; Montoya, 2002; Segura, 2012) coinciden en afirmar que existe una ruptura entre los siglos XVII, XVIII, XIX y XX con respecto a la conceptualización sobre la naturaleza de la luz. Esto se justifica en las diversas formas de significar este fenómeno en la perspectiva clásica y en la moderna. En el siglo XVII, la naturaleza de luz es asumida con un carácter corpuscular con Newton como su primer representante; en los siglos XVII, XVIII y XIX, se concibe la luz como un fenómeno ondulatorio. En este período, grandes físicos como Huygens, Young y Maxwell se basaron en una mirada ondulatoria de la luz para construir sus teorías, un siglo más tarde se encontró inconsistencia al darle solución a algunos problemas en los que se trataba la luz como onda, lo que genera la necesidad de plantear una nueva teoría en la que la luz está constituida de partículas, de tal manera que a partir de dicha hipótesis se le pudo dar solución a los problemas presentados para el momento. Este tipo de situaciones, motivan a realizar un análisis de algunos problemas presentados para la época, en relación con el comportamiento de la luz, puesto que

algunos autores consideran que esta ruptura casusa problemas a la hora de la enseñar de la dualidad-onda partícula.

Inicialmente, en siglo XVII, Newton explica la naturaleza de la luz con una teoría corpuscular, en la que los cuerpos que emiten luz expulsan partículas que chocan con los prismas o cristales, explicando así la propagación rectilínea de la luz, y las leyes de la reflexión y refracción. Al mismo tiempo, Huygens construyó una teoría ondulatoria de la luz, su interés consistía en demostrar que esta se difracta al pasar a través de aberturas o alrededor de obstáculos, comportándose como una onda. En el siglo XVIII, Thomas Young, diseñó el experimento de doble rendija, el cual se apoya en la teoría ondulatoria expuesta por Huygens, donde se hacía evidente el fenómeno de interferencia de la luz, lo cual añade otro efecto ondulatorio a la luz complementado más la teoría de Huygens, haciendo que ésta consiguiera más popularidad dentro de la física. Posteriormente, en el siglo XIX Maxwell, plantea cuatro ecuaciones en las que la luz tiene un comportamiento totalmente ondulatorio, de estas se desprenden resultados tales como la velocidad de la luz y sus componentes electromagnéticos, esta construcción teórica contribuyó a la invención de la energía eléctrica, las ondas radiales, el telégrafo y una nueva perspectiva del universo (espectros electromagnéticos).

A principios del siglo XX surgió el llamado problema del cuerpo negro, el cual es un objeto teórico o ideal que absorbe toda la luz o energía que incide sobre él. Al estudiar este problema se llegó a la llamada catástrofe ultravioleta, donde la teoría de los cuantos de Planck y la teoría de Maxwell explican la radiación del cuerpo negro de maneras diferentes. Se considera que la superficie de un cuerpo negro es un caso límite, en el que

toda la energía incidente desde el exterior es absorbida y, toda la energía incidente desde el interior es emitida, cuando se trabaja la luz con los planteamientos de Maxwell lo anterior no ocurre, lo que trae como consecuencia que la cantidad de energía radiada por el cuerpo negro es infinita, contradiciendo el postulado de la conservación de la energía. Sobre estos asuntos, Max Planck en 1900 construyó una explicación en torno a su ecuación $E=hf$, actualmente conocida como la ecuación de Planck, donde se le dan características corpusculares a la radiación electromagnética (Segura, 2012).

Con la nueva perspectiva de Planck, se le da un carácter corpuscular a toda radiación electromagnética, teóricos como Louis De Broglie profundizaron en la descripción de las propiedades ondulatorias de las partículas y de las propiedades corpusculares de las ondas, surgiendo así una nueva perspectiva, donde las ondas y partículas coexisten en un mismo ente, que cumple las propiedades de la llamada dualidad onda – partícula.

Claramente la ruptura que se muestra en la historia surge cuando todo el andamiaje mecanicista, creado por grandes personajes como Galileo, Newton y Maxwell, no es eficiente a la hora de darle solución a cuestiones como el problema del cuerpo negro y el efecto fotoeléctrico. Más tarde, a estos problemas se les dio respuesta con la creación de dos grandes teorías: la de la relatividad y la teoría cuántica, las cuales introdujeron en el panorama de la física, las ideas de incertidumbre y probabilidad, las cuales iban en contra de las teorías deterministas de la época, sugiriendo así un gran cambio paradigmático de la manera como se concebía la ciencia para la época, lo cual, a juicio de los investigadores, resulta de gran interés examinar.

Una herramienta que resultó de gran utilidad para examinar el cambio paradigmático descrito anteriormente es la historia y la epistemología, la cual, por medio de las cosmovisiones realista y fenomenológica nos muestra, en primer lugar, algunas consideraciones sobre el mecanicismo que, en el marco de una cosmovisión realista, había fundamentado toda la teoría ondulatoria de la luz, además de la cosmovisión fenomenológica, la cual le da cabida a una visión dual para la luz y en segundo lugar, las cosmovisiones nos muestran una potente herramienta para pensar la enseñanza de este concepto, a través de problematizar en torno a las formas de producir ciencia usadas por nuestro teórico, Louis de Broglie, de esta manera, se dedicará el siguiente apartado a un tratamiento sobre la historia y la epistemología.

2.2. Uso de la historia y la epistemología en la enseñanza de las ciencias

Si se ve el problema de la enseñanza en el contexto de la enseñanza misma, por lo general el discurso se agota en reflexiones que quedan en hechos teóricos de difícil aplicación práctica, así se piensa que en la historia y epistemología de las ciencias se pueden encontrar elementos que ayudan a pensarse los problemas de la enseñanza, en este sentido, la visión que cada sujeto tenga sobre la realidad o sobre el conocimiento es determinante a la hora de pensarse la enseñanza, así se encuentra que uno de los elementos que nos brinda la epistemología son las cosmovisiones, es decir, la manera en la cual se vea el mundo es determinante a la hora de reflexionar en torno a la enseñanza. Es así como se plantean las cosmovisiones realista y fenomenológica, dos maneras de ver el mundo que permiten hacerse preguntas tales como ¿qué es la ciencia?, ¿qué es la

realidad?, ¿cuál es el papel del sujeto en la experimentación?, ¿Cuáles son las relaciones causa – efecto?, entre otras, preguntas que aterrizadas en cada cosmovisión dan elementos para pensarse los problemas de la enseñanza.

De manera breve, se puede decir que la cosmovisión realista concibe un mundo natural independiente del sujeto, donde los objetos y fenómenos se encuentran en un escenario externo al observador, toda persona que investigue dicho mundo natural llegará a las mismas conclusiones si sigue el método científico de manera correcta, donde el método científico es un conjunto de reglas y formas de pensar que sirven para desvelar lo que está escondido en la naturaleza, en este orden de ideas, el papel de la ciencia dentro de la cosmovisión realista es el de la herramienta que sirve para desenmarañar los entramados de la naturaleza (Aguilar, 2006).

Por otro lado, en la cosmovisión fenomenológica, se parte de la premisa de que no se puede llegar a conocer la naturaleza tal como es, o el estado puro de la naturaleza, en donde la ciencia como una actividad humana permite hacer representaciones en torno a los fenómenos de la naturaleza. Cuando se observa un árbol desde una cosmovisión fenomenológica, lo que se llama árbol es la representación de la interacción que genera el sujeto con el árbol, si se quisiera conocer el árbol en su estado puro, se tendría que eliminar toda la carga teórica que tenga cada sujeto, pues dicha carga teórica, que difiere en cada persona, es la que hace que al ver un árbol se genere una interacción sujeto – árbol, así, un hombre puede ver al árbol como una planta, mientras que otro lo puede ver como su alimento o su material de construcción, sin embargo, con el paso del tiempo se

ha llegado a un consenso cultural en torno a la palabra árbol y dicho consenso entra en la carga teórica de cada sujeto.

Es por esto que la premisa de que no se puede llegar a la naturaleza tal como es cobra sentido, pues lo que el sujeto ve está atado a su carga teórica, de la cual es difícil sustraerse.

Aplicando este análisis al contexto educativo, se puede observar que un maestro en la cosmovisión realista tendría una concepción totalmente bancaria de la educación, donde su papel sería el de transmitir una serie de conocimientos incuestionables, el papel del alumno es el de un receptor memorístico que no tiene condiciones para apelar a las verdades absolutas que transmite el maestro, y además, el contexto sociocultural no importa, pues el conocimiento realista es válido en cualquier parte y en cualquier momento en el mundo. Por otro lado, un maestro fenomenológico se encarga de construir conocimiento en el contexto sociocultural en el que se encuentre, para que dicho conocimiento sea validado a través de la re-contextualización de las teorías que han sido construidas por otras personas en distintos lugares del mundo. (Elkana, 1983)

El cambio de paradigma implícito en la dualidad onda – partícula, tiene una conexión con las cosmovisiones mecanicista y fenomenológica, desde el punto de vista mecanicista, las miradas de la luz como onda y como partícula son contradictorias, pues en una realidad externa al sujeto e igual para cada observador, la luz no tendría un comportamiento dual, sino un comportamiento establecido que no diera razón a ambigüedades. Dentro de la mecánica cuántica se encuentran situaciones de incertidumbre que no tienen cabida en la cosmovisión realista, pues si el hombre pudiera

conocer las causas primordiales de todo fenómeno, no se tendrían que usar principios de incertidumbre y relaciones de probabilidades en la descripción del mundo, así encontramos que la mecánica cuántica está planteada desde una cosmovisión fenomenológica, donde se establecen relaciones entre variables y donde la dualidad onda – partícula no da lugar a contradicciones, sino que establece una relación de complementariedad, cuando el hombre entendió que nunca habrá un instrumento lo suficientemente preciso para medir la posición y la velocidad exacta de una partícula en un instante dado, es cuando murió la idea de que se puede desenmarañar la naturaleza, explicar cada uno de sus fenómenos y llegar a la esencia de las cosas, por este y otros problemas más, es que murió el llamado mecanicismo (Cassirer,1979).

En ese orden de ideas, la enseñanza de la mecánica cuántica y específicamente de la dualidad onda – partícula cobra sentido, pues además de los contenidos específicos, dichos conceptos llevan implícita la cosmovisión fenomenológica, además de que el estudio profundo de la dualidad onda – partícula sirve para establecer similitudes y diferencias entre las dos cosmovisiones, pues en la construcción de dicho concepto, estuvieron implícitas ambas cosmovisiones, esto con el fin de que el estudiante pueda distinguir su manera de ver el mundo para llegar a reflexiones profundas sobre el conocimiento.

Luego de estas consideraciones epistemológicas, se considera pertinente re-significar la dualidad onda – partícula desde los planteamientos de Louis de Broglie, desde una cosmovisión fenomenológica a través del análisis de ciertos experimentos fundamentales que dieron pie a la formación de una concepción dual para la luz.

2.3. Re-significación de la dualidad onda – partícula a través de los planteamientos de Louis de Broglie

Para el trabajo de re significación de la dualidad-onda partícula se propone el teórico Luis V. de Broglie y sus trabajos basados en la mecánica cuántica. Para identificar por qué consideramos que de Broglie puede ser útil para re significar la dualidad-onda partícula es pertinente hablar un poco sobre su vida académica, sobre su contexto y sus trabajos e investigaciones.

Su nombre completo Louis-Victor Pierre Raymond de Broglie es un físico francés que pertenecía a una de las familias más distinguidas de la nobleza francesa, y era el séptimo duque de Broglie, originario del Piamonte. El apellido original italiano, Broglia, fue adaptado al francés en 1654, por el fundador de la Casa de Broglie. Sus antepasados habían destacado en la política, la diplomacia o el ejército. Cursó estudios de física teórica en la Universidad de la Sorbona, así como de historia en Eslovenia, pues pensaba utilizarlos en su carrera diplomática.

De Broglie a pesar de su vida como aristócrata francés, decidió estudiar física teórica a pesar de sus raíces, además de los distinguidos políticos y militares de los cuales descendía, al ser físico teórico su preocupación no radico en los experimentos ni en la ingeniería, su formación en historia le suponía otros tipos de investigaciones, ya que su interés se encontraba en los argumentos epistemológicos que planteaba la física en el siglo XX, es por esto que después de la primera guerra mundial donde participó, decidió continuar con su trabajo de tesis doctoral, sobre un nuevo concepto que atraía su atención, el concepto del cuanto, un concepto que era propuesto por Max Planck para

explicar la radiación del cuerpo negro y que le da un carácter corpuscular a la luz, concepto que revoluciona la perspectiva clásica de ver el mundo. Esta tesis doctoral le concedió tres años después un premio Nobel, por la publicación del artículo titulado *Recherches sur la théorie des quanta*.

Durante los primeros años del siglo XX surgieron dos grandes interrogantes, el primero el de la incesante búsqueda del éter mediante el experimento de Michelson - Morley y el segundo, el problema sobre la radiación del cuerpo negro ante las que surgieron la relatividad y la mecánica cuántica. En medio de los avances de la mecánica cuántica florece la constante de Planck, un artificio que diseñó empíricamente como respuesta a las cuestiones que surgieron ante el estudio de la naturaleza teórica de la radiación del cuerpo negro, el cual da respuestas acertadas, en el que a cada frecuencia corresponde un átomo de energía. A partir de esto, la constante de Planck impulsa grandes avances en la física.

Luego de esta breve introducción, se procede a un breve desarrollo de cada uno de los experimentos que, según De Broglie (1927) dieron pie al desarrollo de la dualidad onda - partícula.

2.3.1. Dualidad Onda - Partícula.

Inicialmente se mostrará como las ondas electromagnéticas pueden tomarse como partículas, es decir, cómo las ondas pueden ser partículas, a través de la resolución del famoso problema del cuerpo negro (De Broglie, 1927), para posteriormente mostrar

cómo las partículas pueden tener ciertas propiedades ondulatorias, a través del famoso experimento de doble rendija de Young.

2.3.1.2 Propiedades corpusculares de la radiación electromagnética.

A finales del siglo XIX, uno de los puntos que más se estudiaban en la física era la radiación electromagnética, el modelo de la época decía que a medida que se calienta un material, sus electrones vibran produciendo fluctuaciones en los campos eléctricos y magnéticos que se traducen en ondas electromagnéticas o la llamada radiación electromagnética; en este sentido se argumenta que, un cuerpo de hierro se pone rojo a medida que aumenta su temperatura y si esta aumenta más, sus electrones vibrarán con mayor velocidad, es decir, con mayor frecuencia, lo que produce luz de mayor energía, por lo cual, dicho cuerpo comenzará con rojo, para luego pasar al naranja y finalmente al blanco, donde se emite toda la gama de la frecuencia visible y posteriormente el cuerpo comenzará a emitir ondas ultravioleta, que no son visibles por el ojo humano (Rosenblum & Kuttner, 2010).

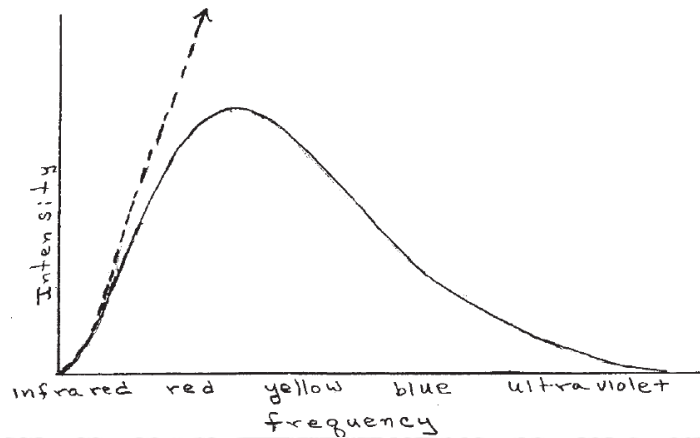


Ilustración 1, Tomada de: El enigma cuántico (Rosenblum & Kuttner, 2010).

En la imagen se observa en la línea punteada la predicción que hace la física clásica al fenómeno descrito anteriormente, mientras que la línea curva muestra los resultados experimentales. De esta manera se encuentra un gran problema en el modelo explicativo de la radiación electromagnética.

Para resolver este problema, Max Planck construyó una ecuación a partir de los ”; posteriormente, Planck (1900) asumió que un electrón sólo puede radiar energía en (Rosenblum y Kuttner, 2010). Al respecto estos autores precisan que:

De esta forma, un electrón vibraría por un tiempo sin perder energía en forma de radiación. Luego, de manera aleatoria y sin causa, sin ninguna fuerza aplicada, radiaría simultáneamente un cuanto de energía en la forma de un pulso de luz. (los electrones también ganarían energía cedida por los átomos calientes mediante tales <<saltos cuánticos>> (...) Planck estaba permitiendo a los electrones pasar por encima de las leyes del electromagnetismo y la ley universal del movimiento de Newton, sólo esta alocada

premisa le permitía obtener la fórmula que describía correctamente la radiación térmica).(p. 72)

De esta manera se llega a conclusión de que la radiación electromagnética puede tener propiedades corpusculares, ya que Max Planck expresó claramente en sus ideas que la radiación está cuantizada, en pequeños paquetes de energía que actúan según las leyes del movimiento para partículas, pues colisionan entre ellas y transportan momentum.

2.3.1.3. Propiedades ondulatorias de los cuerpos.

Para profundizar en las propiedades de los cuerpos, se realizarán una serie de pequeños experimentos mentales que fueron tomados del desarrollo que hace Feynman (1971) de la mecánica cuántica en su libro Lectures on Physics, tomo III.

El primer experimento, llamado experimento con cuerpos, consiste en la creación de un criterio para saber cómo se comportan los cuerpos ante una rendija, el segundo experimento, llamado experimento con ondas, consiste en la creación de un criterio para saber cómo se comportan las ondas al pasar por una rendija, el tercer y más importante experimento, llamado experimento con electrones, consiste en hacer pasar una serie de electrones, que son considerados partícula, por una rendija, para observar cómo se comportan al pasarla y con los dos criterios que se habían construido inicialmente, se determinará si el electrón en realidad es una partícula o es una onda.

2.3.1.3.1- Experimento con cuerpos:

Se tiene una ametralladora que dispara hacia una placa blindada con dos rendijas, tal como se muestra en la figura, esta ametralladora no es muy precisa y dispersa las balas aleatoriamente en un ángulo bastante grande, las rendijas tienen un tamaño tal que sólo permiten el paso de una bala, detrás de la placa hay una pantalla en la cual queda una marca por cada bala que incida en ella. Si se hace el experimento tapando la rendija dos, se obtendrá en la pantalla un patrón que llamaremos P1. Si se realiza tapando la rendija 1, se obtendrá en la pantalla un patrón que llamaremos P2. Si realizamos el experimento con ambas rendijas destapadas claramente se obtendrá que el patrón obtenido es la suma algebraica de P1 y P2 como se observa en la figura.

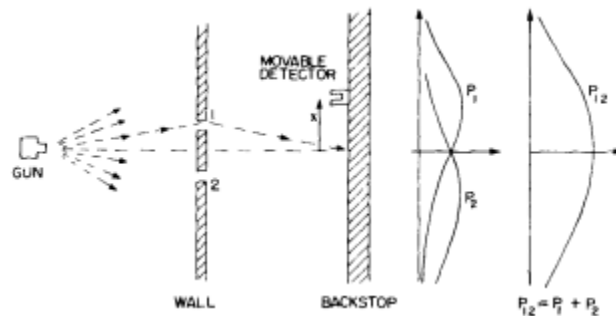


Ilustración 2, Tomada de: Feynman, (1971)

2.3.1.3.2. Experimento con ondas:

Se tiene un montaje parecido al anterior, pero en este caso, el montaje está en el agua y en vez de una ametralladora tenemos un generador de ondas que envía las ondas a una frecuencia dada hacia las rendijas como se muestra en la figura. En este caso, la pantalla es absorbente y permite observar dónde llega cada onda y su intensidad.

Si se realiza el experimento con la rendija 2 tapada, obtendremos en la pantalla un patrón que llamaremos I_1 . Si se realiza con la rendija 1 tapada, obtendremos un patrón que llamaremos I_2 . Si se realiza el experimento con ambas rendijas abiertas, lo que se obtendrá es algo llamado patrón de interferencia, que claramente no es la suma algebraica de I_1 y I_2 .

Así tenemos un criterio para distinguir entre ondas y partículas, pues las ondas interfieren entre ellas pero las partículas no.

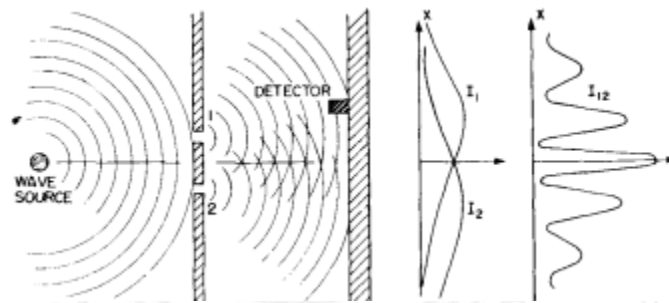


Ilustración 3, Tomada de: Feynman, (1971)

2.3.1.3.3. Experimento con electrones.

Si se realiza el experimento análogo con electrones, los cuales se catalogan como partículas, el resultado esperado es el de las balas, donde el patrón observado es el de una suma algebraica de P_1 y P_2 . Sin embargo cuando se realiza el experimento se encuentra que ¡los electrones interfieren! Esto nos lleva a pensar que los electrones tienen características ondulatorias, y así llegamos a la última pieza fundamental de este rompecabezas, pues si las ondas tienen comportamiento corpuscular y las partículas un

comportamiento ondulatorio, entonces los conceptos de onda y partícula se unifican en algo que se llama la dualidad onda – partícula.

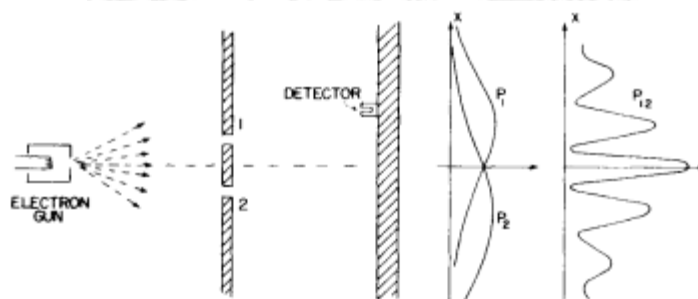


Ilustración 4, Tomada de: Feynman, (1971)

2.3.2. Precisiones conceptuales desde la perspectiva de Louis de Broglie.

Luego de ser testigo de esta gran revolución de la física, de Broglie sostuvo que la naturaleza debe ser simétrica y en ese sentido, si la luz puede ser onda y corpúsculo al mismo tiempo, la materia también debe tener esa dualidad debido a la simetría del universo. (Montoya, 2002), De esta manera, dualidad onda – partícula es una construcción teórica en la que la interpretación del fenómeno físico depende de cómo se entiende el mundo, está claro que la concepción del mundo clásica, no permitía que una observación experimental de un fenómeno arrojara dos explicaciones diferentes del comportamiento de la materia, es a partir de este problema que De Broglie nos convierte en testigos de otra forma de entender el mundo, entendiendo que la naturaleza puede adecuarse a un comportamiento dual y que el observador hace parte integral de cómo se entiende el mundo y la manera de describir tal comportamiento, también depende de su iniciación teórica.

La pregunta por un comportamiento dual de la materia para De Broglie radica en la estructura cuántica de la energía, su hipótesis se basa en el modelo fotoeléctrico descrito por Einstein (De Broglie, 1927), el propuso una teoría revolucionaria acerca de la naturaleza corpuscular de las ondas electromagnéticas en la que intervenía de manera fundamental, el cuanto de acción de Planck, más específicamente a ondas electromagnéticas asociadas a la luz y a fotones con energía cuantizada. (Einstein, 1905) De Broglie asume que si la luz que clásicamente se comporta como una onda y ahora se había podido comprobar que esta también poseía la naturaleza de partícula, entonces la materia que clásicamente se toma como distribuciones continuas de partículas, puede poseer una naturaleza ondulatoria. Este principio lo adecuó a la caracterización de ondas que poseían comportamientos cuánticos.

De esta manera, dedujo una expresión simple para la longitud de onda de cualquier $\lambda = \frac{h}{mv}$, donde m es la masa del cuerpo y v la velocidad a la que este se mueve.

En este sentido, si se calcula esta longitud de onda para una roca de 50 kg moviéndose 10^{-33} m, lo cual es una longitud totalmente imperceptible para cualquier instrumento humano, es decir, la onda asociada a dicha roca no tiene importancia física, sin embargo esta longitud de onda cobra sentido para cuerpos de masa muy pequeña que se mueven a velocidades bastante altas comparadas con las que estamos acostumbrados a percibir.

Así se unificó la naturaleza dual de la materia y se llegó a que todo cuerpo tiene una onda asociada, donde los estados de onda y partícula simplemente sirven para describir los fenómenos según el experimento que se esté realizando.

Por otro lado, de Broglie, (1927), se refiere a los fotones como “paquetes de energía”, además, encuentra que a cada uno de esos paquetes de energía, se le puede asociar lo que él llama un “fenómeno periódico”, que resulta de combinar la famosa ecuación de la relación de Planck $E=h\nu$, de donde De Broglie obtiene la relación $\lambda^2=hf$, por lo tanto, él ilustra esto con un electrón de la siguiente manera:

Un electrón es para nosotros un arquetipo de paquete aislado de energía, donde nosotros creemos, quizás incorrectamente para saber bien, pero por la sabiduría recibida, que la energía de un electrón está distribuida en todo el espacio, con una fuerte concentración en una región muy pequeña, pero además, de estas propiedades no sabemos mucho.” (De Broglie, 1924, p. 16)*

De esta manera, se observa como de Broglie problematiza la concepción del espacio que ocupa una partícula material como un electrón, cuando afirma que la energía del electrón está distribuida por todo el espacio, con una fuerte concentración en una pequeña región del espacio, así, claramente se le da un carácter ondulatorio y energético a la materia, lo que constituye un gran salto en el pensamiento, pues la materia con la que está hecho todo lo que conocemos tiene propiedades ondulatorias, esta idea fue problematizada, hasta el punto que hoy en día no se ha integrado a la vida cotidiana, como se observa en esta cita:

* Traducción realizada por los investigadores del texto *Recherches sur la théorie des quanta* (1924)

“con el descubrimiento de Planck y Einstein, nació la primera paradoja cuántica: la luz y otras formas de energía tienen doble personalidad y a veces se comportan como ondas y a veces como partículas. Para el físico Newtoniano clásico, esto tenía tanto sentido lógico como decir que una gota de agua es también una piedra” (Briggs, 1989, p 42 – 43)

Capítulo 3. Metodología

3.1. Enfoque y Método

Por tratar de comprender cómo resignificar la dualidad onda partícula que permita precisiones conceptuales en un enfoque integral de la dualidad onda- partícula, esta investigación se inscribe en un enfoque cualitativo (Hernández, Fernández & Baptista, 2003); en tal sentido, su carácter flexible y la interpretación permanente son aspectos característicos que posibilitan la asignación de significados a las maneras como los casos explican el comportamiento dual de la luz.

El interés de la presente investigación va encaminado, precisamente, a comprender cómo resignificar el fenómeno de la luz desde los planteamientos Louis-Victor de Broglie, vía la precisión conceptual de un enfoque integral de la dualidad onda partícula. Para este proceso de construcción de significados se requiere de una interpretación permanente como herramienta que permitirá tal re-significación. Se busca analizar las condiciones y procedimientos que plantea De Broglie (1924), para formalizar el comportamiento de la luz, así mismo los modelos explicativos de los casos sobre este tema de investigación.

En este caso la diversidad y la subjetividad de los informantes resulta una fortaleza, pues posibilita dar cuenta de diversas construcciones personales, que irán enriqueciendo la investigación al establecer relaciones inéditas en el comportamiento de la luz. El método de investigación seleccionado fue el estudio de caso instrumental (Stake, 1999), el cual posibilita comprender la relación entre el concepto de dualidad onda - partícula, a la luz de los modelos explicativos de los casos y el análisis de los teóricos.

En general, tener como interés comprender los asuntos relacionados con el comportamiento de la luz y por estar este proceso direccionado por las interpretaciones e intencionalidad de los investigadores; esta investigación se ha enmarcado en un enfoque cualitativo con el método de estudio de caso.

3.2. Contexto e informantes de la investigación

Esta investigación se realizó en la Universidad de Antioquia, la cual se sitúa en la ciudad de Medellín, departamento de Antioquia de la República de Colombia; en la dirección: Calle 67 N° 53 – 108. Este plantel educativo oficial y mixto cuenta con una población estudiantil de diversos estratos socioeconómicos, siendo dominantes los estratos uno, dos y tres.

En esta misma línea es preciso aclarar que su selección obedece las siguientes razones: la primera es porque se considera que en la Universidad la temática de la dualidad onda -

partícula se enseña con el rigor y la profundidad que esta amerita, rigor que posiblemente no encontraríamos si esta investigación se realizara en la educación media, segundo porque se considera que las experiencias que se dan en el contexto escolar son similares a las que se dan en el contexto universitario, cabe aclarar que esta investigación se realizó a futuros docentes en el área de física; y tercero porque nosotros como investigadores pensamos que es en la Universidad donde los estudiantes construyen mejores modelos explicativos sobre el tema de investigación y finalmente, porque se desea brindar fundamentos que contribuyan al fortalecimiento de la licenciatura en matemáticas y física.

De acuerdo con lo anterior, se opta por seleccionar 4 informantes para la investigación, que se encuentran en un rango de edad de 18 a 25 años, pertenecientes a la licenciatura en matemáticas y física, ya que su profundización en fenómenos y conceptos en física de la luz es más completa que las otras licenciaturas que forman docentes para el área de física, se tuvo en cuenta el interés que presentan por el área, los investigadores consideramos que esto posibilita una mayor disposición a la temática y un mayor interés, también se tuvieron en cuenta las dificultades que manifiestan estos cuatro casos con los conceptos de luz, la disponibilidad para participar en la investigación, ya que se requiere tiempo para participar en las actividades experimentales y finalmente que representen beneficio a las intenciones propias de la investigación.

3.3. Fases de la investigación

En conformidad con las intencionalidades de los investigadores y acorde al tipo de investigación establecida, se realizó esta investigación a partir de tres fases, se aclara que la finalidad de las mismas es contribuir al cumplimiento pleno de los objetivos previamente establecidos.

En este orden de ideas, las fases de investigación están filtradas por un proceso continuo de revisión de expertos y pares de la línea a la cual se inscribe esta investigación, por la cual se somete a consideración cada uno de sus componentes, buscando con ello brindar mayor credibilidad, claridad y confiabilidad a los resultados obtenidos en el proceso. Siendo las socializaciones y diálogos, manifestaciones de avances que se traducen en consensos y parte fundamental en la legitimación del proceso.

3.3.1. Primera Fase. En esta fase, se procedió a dimensionar algunos de los componentes estructurales de la investigación, efectuando la identificación y caracterización del contexto en el que se lleva a cabo. Se procedió a la identificación del problema y planteamiento del mismo a partir de problemáticas identificadas en el contexto escolar y universitario, con base en esto, se procedió a la revisión bibliográfica para identificar el estado de la discusión sobre el comportamiento dual de la luz, referentes que a su vez proporcionaron claridad a la formulación del problema, lo cual permitió el establecimiento de objetivos a acordes con la intencionalidad de los

investigadores. En esta fase también se inició la construcción del diseño general del proyecto, el cual se presenta en esta convocatoria.

3.3.2. Segunda fase. En esta fase el trabajo de investigación estará centrado en el enriquecimiento del marco conceptual por medio de un análisis histórico y epistemológico de la perspectiva de De Broglie (1924). Sumado a lo anterior, en esta etapa se avanzará la precisión los aspectos metodológicos, específicamente el diseño y revisión de instrumentos, para su posterior aplicación. Una vez obtenida la información proporcionada por los casos y los planteamientos de los teóricos se procederá a su sistematización y análisis.

3.3.3. Tercera fase. En esta etapa se continuará con el análisis de la información aportada por los casos con el fin de avanzar en la re-significación del comportamiento dual de la luz, lo cual permitirá precisar la ruta de significación que ha ido emergiendo durante el proceso. Finalmente a partir del análisis de la información obtenida se determinarán los hallazgos y conclusiones, diseñando en tal sentido, una secuencia didáctica que vincule los aportes de los casos y el análisis histórico y epistemológico de los teóricos. Además en esta fase se socializará el informe final ante la comunidad académica de la Facultad de Educación.

3.4. Recolección y análisis de los datos

3.4.1. Recolección de los datos.

Las estrategias para recoger la información serán entonces todas aquellas que den cuenta de los discursos de los casos seleccionados, tales como: Entrevistas semiestructuradas, protocolos de observación, grabaciones de audio y video de las clases y prácticas de laboratorio en las que ellos participan.

Se hace necesario hacer una distinción entre los métodos y los instrumentos usados, entre los métodos están la observación, las entrevistas y los encuentros académicos, mientras que entre los instrumentos están las actividades experimentales y los cuestionarios tipo entrevista.

Los métodos son vistos como la forma de llegar hasta cada uno de los casos o informantes, es por esto que en primer lugar, la observación fue usada como una forma de selección de los casos, ya que desde la monitoria de física de la luz y la asistencia al curso de mecánica cuántica, se pudo afinar cada uno de los criterios de selección descritos anteriormente, para llegar a escoger los casos que se consideraban pertinentes para la investigación, dicha observación se realizó a partir de los diarios de campo.

Luego de definidos los casos, se procedió con las entrevistas y los encuentros académicos, en donde también se combinaba la observación pero de una forma más directa. En los encuentros académicos, se discutía en torno a elementos experimentales, donde se escuchaba a los informantes y se observaba cómo se relacionaban con cada uno

de los elementos experimentales, para luego pasar a la entrevista, en donde los informantes materializaban sus ideas.

Ahí es donde vemos los instrumentos, pues, en primer lugar, los elementos experimentales, junto con una serie de orientaciones por parte de los investigadores, sirven de instrumento para observar cómo los informantes se relacionan con dichos materiales y, en segundo lugar, el cuestionario tipo entrevista nos mostraba las ideas de cada informante en torno a cada uno de los fenómenos observados.

De esta manera, se usaron tres entrevistas tipo cuestionario, en donde los informantes tenían interacción con el investigador y con una serie de elementos experimentales que servían para que cada informante reflejara sus modelos de comprensión de cada concepto. Se deja al lector los tres cuestionarios tipo entrevista en los anexos.

Inicualmente se aplicó una entrevista en la cual se indagaba por las concepciones iniciales de los casos en torno a la dualidad onda – partícula, en este instrumento no se usó ningún material de laboratorio y las preguntas iban dirigidas a la caracterización de los modelos explicativos de cada informante, modelos que habían sido formados en los cursos vistos en la universidad. (Anexo 1)

El segundo instrumento estaba dirigido a caracterizar los modelos explicativos de los informantes en torno a una concepción ondulatoria de la luz, en esta entrevista los informantes disponían de una serie de materiales para reproducir el famoso experimento

de la doble rendija de Young, donde ellos podían disponer de cada elemento a su antojo para poder responder una serie de preguntas sobre dicho experimento (Anexo 2), en ese sentido, la entrevista no consistía en ningún tipo de guía experimental en torno al experimento de Young, sino que cada uno de los informantes tenían total autonomía para reproducir dicho experimento con las variaciones o cambios que considerara pertinentes hacer.

El tercer instrumento estaba enfocado en caracterizar los modelos explicativos de los informantes en torno a una concepción de la luz como partícula, en donde se hacía referencia a el fenómeno conocido como el efecto fotoeléctrico para posibilitar que dichos modelos explicativos se hicieran explícitos (Anexo 3), al igual que el segundo instrumento, los informantes tenían plena autonomía para disponer de los materiales además de que este fue un experimento de nuestra propia autoría que resultaba bastante amigable para cada uno de los informantes.

De cada uno de estos instrumentos obtuvimos una serie de respuestas entre las que se encontraban diagramas y otras formas en las cuales les solicitábamos a los informantes que explicitaran la información, además de esto, los instrumentos estaban fundamentados en el tratamiento que el mismo De Broglie le hizo a la dualidad onda – partícula, ya que estos estuvieron basados en los dos grandes experimentos que le dieron el carácter dual a la luz, en primer lugar, el experimento de Young que confirmó por primera vez la naturaleza ondulatoria de la luz, experimento que prácticamente sepultó la teoría de los corpúsculos de Newton y que dio pie a toda una formulación matemática del

fenómeno de la luz en las famosas ecuaciones de Maxwell, por otro lado, el efecto fotoeléctrico, descubierto por Albert Einstein, el cual, basado en la hipótesis de los cuantos de Planck, desarrolló una teoría que funcionaba con la parte experimental, dándole así un carácter corpuscular de la luz y mostrando la primera paradoja de la física moderna, paradoja también llamada dualidad onda – partícula.

Por esto se considera pertinente introducir estas prácticas experimentales como una forma de recolección de datos, pues en primer lugar, de esta manera es como históricamente se llegó a la formulación de la dualidad onda – partícula y en segundo lugar, consideramos que darle un papel protagónico al informante, al permitirle que reprodujera estos experimentos con los cambios que considerara pertinentes es un factor que ayuda bastante a que cada uno de los informantes expresen tranquilamente sus ideas en torno a estos conceptos, ideas que después podrán ser analizadas de una manera más simple.

En el procedimiento de análisis se contempló la triangulación entre métodos, instrumentos, y la obra de Luis Victor de Broglie, esta triangulación se describe en (Hernández, Fernández & Baptista, 2003). La codificación y categorización, facilitarán la organización de la información disponible a partir de los documentos, cuestionario, entrevistas, talleres y actividades experimentales.

Estos procesos se ejecutaran a lo largo de toda la investigación. Se utilizaron diferentes estrategias como juicio de pares, triangulaciones, confrontación con los

participantes, y pilotaje de las entrevistas; para garantizar que la interpretación corresponda con los elementos teóricos de base y evitar al máximo la subjetividad y de esta manera darle una mayor credibilidad a la investigación.

3.4.2. Análisis de los datos.

El procedimiento utilizado para analizar los datos será el (grounded theory) o teoría fundamentada que determina los hallazgos emergentes de la información, para determinar dichos hallazgos es importante codificar la información, para esta codificación se realizó en una matriz de doble entrada en cada uno de los instrumentos (anexo 4).

Los casos o informantes serán considerados como unidades de análisis, en la investigación cualitativa una unidad de análisis es la fuente por la cual se llegue a hipótesis, explicaciones o teorías sobre la pregunta planteada, la naturaleza de los datos dependerá en gran medida del ambiente y el contexto de la unidad de análisis, como nuestro propósito es entender los diferentes significados que se tienen sobre la dualidad onda-partícula, más que entender los casos como unidad de análisis es entender sus significados, según Sampieri (2010) los significados también pueden ser unidades de análisis ya que

Son los referentes lingüísticos que utilizan los actores humanos para aludir a la vida social como definiciones, ideologías o estereotipos. Los significados van más allá de la conducta y se describen, interpretan y justifican. Los significados compartidos por un

grupo son reglas y normas. Sin embargo, otros significados pueden ser confusos o poco articulados para serlo; pero ello, en sí mismo, es información relevante para el analista cualitativo. (p.409)

Las categorías son conceptos, experiencias, ideas, hechos relevantes, que surgen de la información y que codificamos para darles significados y desarrollarlas como ideas; también surgen como hipótesis a nuestro problema. Las categorías dependerán de la información suministrada por los informantes o del planteamiento del problema; éstas están sujetas a los intereses de la investigación y del juicio del investigador, se determinan entonces dos clases de categorías:

- Categorías apriorísticas

Estas categorías se tomaron a partir del rastreo literario y del planteamiento del problema, en otras palabras se basan en los tres puntos claves o puntos problemáticos, una finalidad de estas categorías es identificar cómo los cuatro informantes comprenden la dualidad onda-partícula en cada una de las actividades experimentales propuestas en los cuestionarios tipo entrevista.

- Categorías emergentes

Después realizar la sistematización de los instrumentos, se encontró que dentro de los modelos explicativos de los informantes era necesario crear otras categorías que permitieran representar la significación de la dualidad onda-partícula, estas categorías se

crean a partir de la información suministrada dentro de los cuestionarios tipo entrevista. Se puede decir también que estas categorías dependen directamente de las unidades de análisis.

Tabla 1, Categorías apriorísticas y emergentes

| Categorías apriorísticas | Categorías emergentes |
|--|---|
| La luz como una onda. | La luz como partícula pero sus modelos explicativos tienden a un modelo ondulatorio. |
| La luz como partículas | La luz como partícula y sus modelos explicativos van de acuerdo con el modelo corpuscular de la luz. |
| la luz con un comportamiento dual | El comportamiento dual de la luz como una suma de efectos de ondas y partículas. |
| La materia solo posee un comportamiento clásica y mecanicista. | El comportamiento dual de la luz donde los efectos de onda y partícula se complementan |
| La materia desde una perspectiva moderna y dual. | Los conceptos de onda y partícula como equivalentes para explicar el comportamiento dual de la luz. |
| | La propagación de la luz en el espacio no refleja comportamientos ni de onda ni de partícula, solo de rayos de luz. |

Después de especificar nuestras unidades de análisis, es pertinente codificar la información, esto se hace con el objetivo de tener una descripción completa y estructurada de la información, eliminando así información irrelevante y poco importante, la codificación en la investigación cualitativa se hace a partir de segmentos o frases de contenido, es decir, tomamos una frase o segmento de nuestra unidad de análisis y determinamos qué significado, implicaciones y contenido teórico, tienen; para luego comparar cada frase, si son iguales en su significado y su contenido teórico, estas pertenecen a una misma categoría, si no lo son entonces es pertinente generar otra categoría en la cual si este acogida.

Capítulo 4. Hallazgos

Este capítulo se estructura a partir del sistema de categorías construido para el análisis. Cada una de las categorías de desarrollan a partir de los planteamientos del teórico (Louis de Broglie) de los casos y de las consideraciones de los investigadores.

En la categoría 4.1, se examina la luz como onda, desde la perspectiva de teorías creadas a partir del siglo XVIII (Segura, 2012), que hoy en día siguen vigentes y que se logran observar en las secciones de los libros de texto que tengan que ver con la llamada física de la luz (Serway, 2005; Reese, 2002; Reisnick, 2005) de esta manera se observa cómo esta categoría es una de las más importantes para esta investigación. Posteriormente se analiza la luz como partícula en la categoría 4.2, donde se retoman las concepciones de Newton (1687) en el siglo XVII , complementándolas con las teorías de Planck (1900) el cuál teorizó sobre la luz en tiempos mucho más modernos, e introdujo la

contraparte de la teoría ondulatoria, lo que causó el surgimiento de la categoría 4.3, donde se analiza la luz con comportamiento dual, a partir de la unión que hizo De Broglie (1924) de las dos categorías anteriores y de todo el surgimiento de la nueva física, la mecánica cuántica, en donde la concepción de una luz que puede ser onda y partícula fue acogida perfectamente, al igual que el principio de incertidumbre de Heisenberg.

A parte de esto, las categorías 4.4 y 4.5 están enfocadas en la materia, esto es porque de la misma manera en como la luz llegó a tener una concepción dual, la materia, que antes era considerada totalmente como partícula, según la categoría 4.4 que muestra a la materia desde una perspectiva clásica y mecanicista, sin embargo, con los trabajos de De Broglie (1924), la materia comenzó a tener propiedades ondulatorias, como se muestra en los experimentos mentales citados en el marco teórico de esta investigación, realizados por Feynman (1971), estas propiedades ondulatorias, dieron pie a la creación de la categoría 4.5 donde se examina la materia con un comportamiento moderno y dual en el marco de la física moderna y especialmente, la mecánica cuántica.

4.1. La luz como onda

La luz como onda, es entendida muchas veces desde su relación con las diferentes experiencias que dieron lugar a esta teoría, es evidente que cuando se habla de la luz como onda se remite inmediatamente al experimento de la doble rendija, en el cual, Young nos muestra que la luz tiene un comportamiento ondulatorio cuando se observan manifestaciones de interferencia, fenómeno que sólo se atribuye a las ondas, De Broglie (1924) ilustra esto de la siguiente manera:

El inicio del siglo XIX, mostró una tendencia hacia la teoría de Huygens (teoría ondulatoria), los efectos de interferencia, que se vieron en los experimentos de Young, eran muy difíciles o imposibles de explicar por una teoría corpuscular, posteriormente, Fresnel desarrolló su hermosa teoría elástica de la propagación de la luz y las ideas de Newton (de la luz como partícula) perdieron credibilidad irremediablemente. (p 24-25)[†]

Así se observa la importancia y relevancia de esta teoría, pues es la teoría que impulsó todo el desarrollo de las telecomunicaciones que tenemos actualmente, a través de las ondas de radio, redes de wifi, microondas y otros fenómenos ondulatorios en torno a la luz que se han arraigado hoy en día en nuestras sociedades

Dado que la intención principal, en esta investigación, era comprender cuáles son los modelos explicativos de los informantes en torno a un comportamiento dual de la luz, se plantearon situaciones físicas que permitían analizar el comportamiento de la luz en diversos contextos.

En las respuestas dadas por los informantes se pudo evidenciar que estos tienden a incluir en sus respuestas argumentos que muestran un comportamiento ondulatorio de luz (informantes 1, 2, 3, 4), en primer lugar, las explicaciones de los informantes en torno a la propagación de la luz en el espacio, generalmente incluyen modelos en los cuales se

[†] Traducción original realizada por los investigadores del texto *Recherches sur la théorie des quanta* (1924)

toma a la luz como onda, donde se hace referencia a las ondas electromagnéticas de Maxwell (informante 4) y a el color como una consecuencia directa de propiedades ondulatorias tales como la longitud de onda o la frecuencia (informante 3), además de esto, cuando se indaga en torno al experimento de doble rendija de Young, las concepciones de todos los informantes tendían a un comportamiento ondulatorio para la luz, en el cual, en algunas ocasiones se incluían algunos conceptos de partícula pero totalmente desligados de los conceptos ondulatorios; así se observa cómo el fenómeno de doble rendija de Young, descrito anteriormente, es explicado casi en su totalidad por una concepción ondulatoria, donde no se toma en cuenta la dualidad onda – partícula, así se encontraron explicaciones tales como “la luz actúa como una onda que sufre una interferencia...” (Informante 1), “después de atravesar las rendijas, la luz se comporta como una onda, en la cual (...) se generan nuevas ondas” (informante 2), “el rayo de luz llega hasta la rendija en la cual se difracta de tal manera que al llegar a la pantalla (en cada punto) es la superposición de las diferentes ondas “emitidas” desde la rejilla” (informante 4).

Cuando se indaga sobre el efecto fotoeléctrico, que por lo general es explicado desde concepciones de la luz como partícula, por medio del uso de los conceptos de momentum y de colisiones, sorprendentemente los informantes 1, 2 y 4 usan los conceptos ondulatorios y crean explicaciones en donde la luz emitida lleva una frecuencia y cierta energía que hace vibrar a los átomos haciendo que estos produzcan luz, como se observa, “la energía transportada por la luz ultravioleta es mayor (...) por tal motivo, la lámina fluorescente, al iluminarla con luz ultravioleta queda alumbrado” (informante 2) “esto

puede ocurrir porque a menor longitud de onda, mayor energía, por lo cual, cuando la figura absorbe mayor energía, mayor intensidad lumínica emite” (informante 4) una de las respuestas dadas hace una analogía entre la fuente de luz y los electrones de un átomo suponiendo que estos se comportaban como diapasones que entran en resonancia (ver imagen 1), donde claramente se trata de explicar un fenómeno en torno a la luz con explicaciones provenientes de la teoría ondulatoria que explica el sonido, observando así frases como “La onda pulsaría repetidamente a los electrones haciéndolos vibrar” (informante 1)

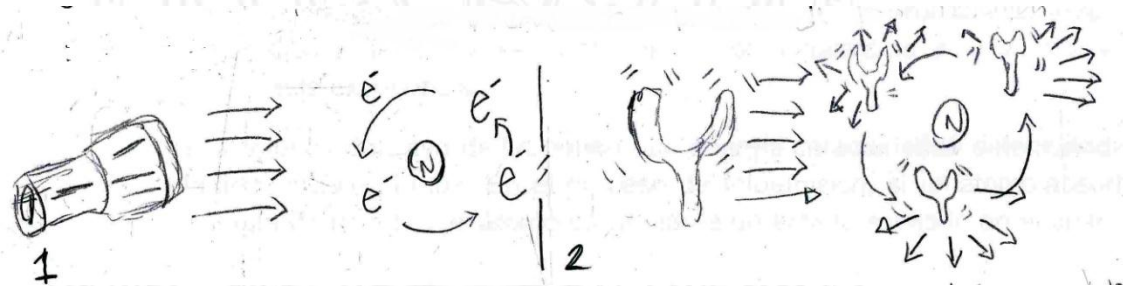


Ilustración 5, (Informante 1)

De esta manera, se observa como la teoría ondulatoria de la luz sigue arraigada en los informantes, tanto los que estudian la física de la luz, como los que estudian la física moderna, al punto de que renuncian a las teorías que les han sido enseñadas para continuar con su concepción ondulatoria de la luz.

4.2. La luz como partículas

Otra forma de explicar la propagación de la luz es la de los fotones, introducida por Newton en el siglo XVII, donde explicaba la luz por medio de una analogía con la teoría de la dinámica de partículas, ya que la dinámica newtoniana había tenido grandes éxitos considerando los cuerpos como constituidos por infinitas partículas ideales adimensionales, esto lo explica De Broglie (1924) contundentemente de la siguiente manera:

(...) mientras que Newton haciendo una analogía con la teoría de la dinámica de partículas materiales que él había creado, desarrolló una teoría corpuscular, la llamada “teoría de emisión”, lo que le permitió, aunque con hipótesis artificiales, explicar efectos que hoy en día consideran los efectos ondulatorios (Por ejemplo, los anillos de Newton).
(p 24)[‡]

Newton intentó utilizar esta misma forma de resolver problemas para el fenómeno de la luz y le funcionó para fenómenos tales como la propagación rectilínea de la luz y la reflexión, ya que dicho fenómeno se explicaba como colisiones de partículas llamadas fotones sobre una superficie refractante, así se introducen principios como el de la conservación del momentum en las explicaciones sobre fenómenos de la luz.

[‡] Traducción original realizada por los investigadores del texto *Recherches sur la théorie des quanta* (1924)

Posteriormente, se retomó la teoría corpuscular de la luz en el siglo XX, con el nacimiento de la concepción moderna de la luz, la cual, tiene sus orígenes en los razonamientos epistemológicos de la misma física (De Broglie, 1927), esta surgió como explicación a uno de los problemas físicos que tenían los teóricos clásicos, la radiación del cuerpo negro, la importancia de dicha teoría radica en sus argumentos epistemológicos que dieron surgimiento a la mecánica cuántica y un nuevo paradigma en ciencias.

Los cambios introducidos por la concepción corpuscular de la luz han producido una ruptura en el mundo físico que es evidente en los modelos explicativos de nuestros informantes, la luz es entendida como partícula a razón de la importancia y relevancia de la teoría misma pero los argumentos dados por los informantes tienden a explicaciones ondulatorias de la luz: “en un primer instante el haz de luz que sale del láser lo hace en línea recta, después de atravesar las rendijas, la luz se comporta como onda” “(informante 2), la luz como onda ha dado explicación a un gran número de fenómenos físicos, por lo cual hoy en día es utilizada en un gran número de libros de texto (Serway, 2005; Reese, 2002; Reisnick, 2005) y cursos que explican los fenómenos en torno a la luz.

Así se observa que los informantes 1 y 2, que no han tenido mucho acercamiento a los modelos explicativos mecánico – cuánticos, utilicen reiteradamente la concepción ondulatoria de la luz para explicar los fenómenos observados, así se encuentra una contradicción, pues dicho informante si ha estudiado las teorías enseñadas en el curso llamado “física de la luz” sin embargo sus concepciones no son suficientes, pues en

ciertos fenómenos que se requiere de un tratamiento corpuscular para la luz, el informante continúa usando los modelos ondulatorios.

Por otro lado, los informantes que asumen la luz como partícula, mantienen una concepción clásica en torno a dichas partículas, por lo cual utilizan conceptos como trayectoria, choques, velocidades y otros conceptos de la mecánica newtoniana, en experimentos como el de la doble rendija de Young, donde estos conceptos no están en concordancia con la teoría moderna de la luz, pues cuestiones como la trayectoria de un fotón no están definidas debido al carácter no determinista de la física moderna, por eso se observan explicaciones como “en primer momento, el fotón se mueve en línea recta hasta llegar a la doble rendija” (informante 2) o “el fotón llega a la rendija de manera lineal y al pasar la rendija adopta un movimiento ondulatorio hasta llegar a la pantalla” (informante 3).

Cuando se indaga sobre el efecto fotoeléctrico, los informantes 2, 3 y 4 tienden a incluir más alusiones a la luz como partícula, ya que entienden que la energía de la luz se transfiere a un átomo por medio de una colisión, como se observa fácilmente en sus respuestas, “cuando los fotones colisionan con los átomos, éstos van absorbiendo la energía que transportan los fotones” (informante 4), “el momentum lineal e los fotones es transferido al colisionar con los átomos” (informante 2), “el átomo absorbe energía mediante la colisión del fotón con un electrón” (informante 3). El efecto fotoeléctrico fue explicado por Einstein con una teoría totalmente de partícula y es por esto que consideramos que los informantes se remitieron a esta teoría.

4.3. La luz con comportamiento dual

Con el problema del cuerpo negro, Max Planck introdujo la famosa ecuación de Planck (Rosenblum y Kuttner, 2010), donde la luz se modelaba como una serie de pequeños paquetes de energía, determinados por dicha ecuación, esta concepción fue exitosa y llevó a Albert Einstein a explicar el fenómeno del efecto fotoeléctrico, cuestión que le adjudicó el premio Nobel; sin embargo, anteriormente se había desarrollado toda una teoría basada en la concepción de la luz como onda, teoría que había sido finalizada con broche de oro con las famosas cuatro ecuaciones de Maxwell, las cuales explicaban perfectamente los fenómenos en torno a una luz completamente ondulatoria (De Broglie, 1924) que tenía una gran aceptación al interior de la comunidad científica debido a que funcionaba con los cimientos de la mecánica y tenía un modelo completamente determinista, de ahí surgió el problema de que habían dos clases de luz que funcionaban en teoría y, en consecuencia, surgió la pregunta: ¿cuál de las dos en realidad era la luz?

De esta manera, De Broglie (1924) introdujo el concepto de la dualidad, dejando a un lado la preocupación por cuál de las dos era la luz y simplemente asumió que la luz es ambas al mismo tiempo, entendiendo que estas concepciones se complementan para explicar todos los fenómenos que hemos observado hasta ahora en los cuales está implícita la luz.

Esta explicación dio un salto epistemológico, pues hasta ahora la concepción mecanicista, que reinaba en el mundo de la física no permitía que la luz fuera dos cosas al mismo tiempo, ya que según estas concepciones (para ese momento), la naturaleza es una

sola, independiente del sujeto que la estudie, así, para el caso de la luz, no se podían tener dos concepciones distintas que coexistieran al mismo tiempo.

No obstante, a partir del año 1900, con los aportes de Max Plack y Albert Einstein, empieza un cambio de rumbo sobre el análisis y explicaciones del comportamiento de fenómenos como la luz. (Cassirer, 1979) Este fenómeno encuentra un terreno fértil en la perspectiva fenomenológica en la cual para dar cuenta de un fenómeno el interés se centra en el establecimiento de relaciones. Si se aborda la luz desde una concepción fenomenológica, se observa que como la naturaleza es una construcción de cada observador, según su carga teórica y sus modelos explicativos, claramente podrían tener lugar las dos concepciones de la luz, pues según sea el fenómeno que se está observando y las condiciones del experimentador, bien se podría llegar a una concepción ondulatoria o corpuscular, en donde ninguna contradeciría a la otra.

Contrario a esto, se encontró que el informante 4 entiende la dualidad onda – partícula como una suma algebraica de efectos (Greca & Herscovitz, 2002), y no como dos explicaciones complementarias, de ahí encontramos explicaciones tales como: “La luz puede comportarse en forma de onda electromagnética o en un rayo (chorro de fotones) dependiendo de la situación...” (Informante 4)

Otro ejemplo, ilustrado en la figura 2, está en relación con el informante 1, este, para dar cuenta del experimento de doble rendija de Young (1804), usó dos explicaciones completamente independientes, en una explicaba el fenómeno con argumentos, que a juicio de los investigadores, se sitúan en una concepción ondulatoria y en la otra parecieran situarse en una concepción corpuscular y, según lo argumentado, no fue

posible evidenciar que estableciera relación entre las dos perspectivas. Otra concepción que encontramos en los informantes 1, 2 y 4, es que para explicar el fenómeno de la doble rendija, inicialmente usan una concepción corpuscular de la luz para explicar la propagación rectilínea de la luz: “la trayectoria (de los fotones) es rectilínea y a velocidad constante” (informante 1), “en primer momento, el fotón se mueve en línea recta hasta llegar a la rendija” (informante 2), “el fótón llega a la rendija de manera lineal” (informante 4) , y posteriormente, luego de que la luz atraviesa la rendija, se usa una concepción ondulatoria, para explicar el fenómeno de interferencia: “la luz actúa como una onda que sufre interferencia contra las rendijas” (informante 1), “después de atravesar las rendijas la luz se comporta como una onda” (informante 2), “al pasar la rendija (el fotón) adopta un movimiento ondulatorio hasta llegar a la pantalla” (informante 4), en donde en ningún momento se relacionan las dos concepciones.

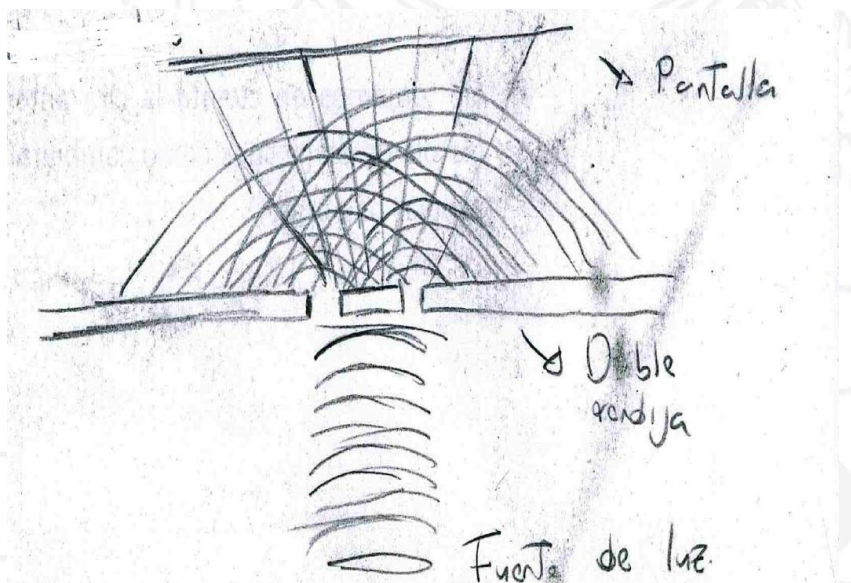


Ilustración 6, (Informante 1)

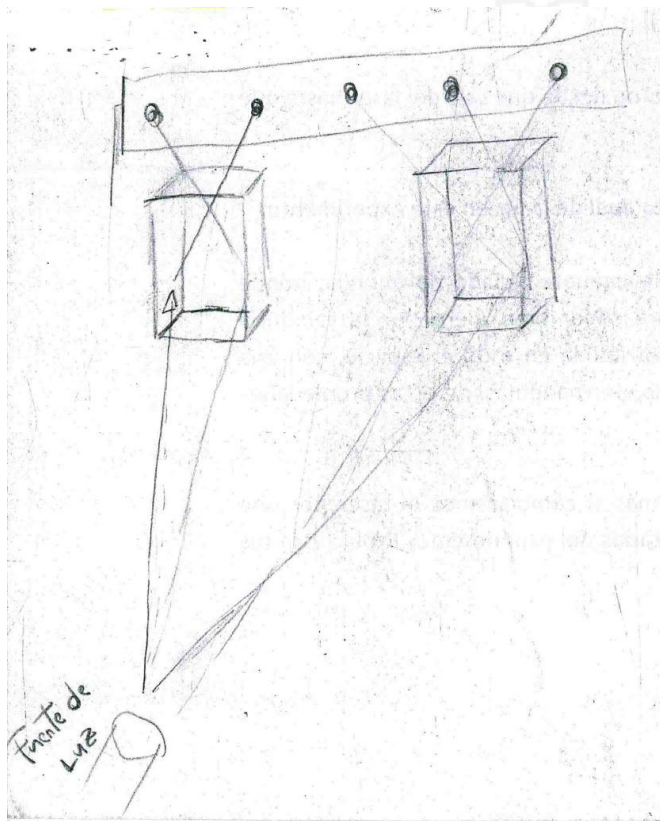


Ilustración 7, (Informante 1)

4.4. La materia desde una perspectiva clásica y mecanicista

Newton (1687) en sus Principia desarrolló la teoría de la llamada Mecánica newtoniana, una teoría que sigue usándose en nuestros días y aún es el pilar fundamental de la física que se enseña en los colegios, esta teoría tuvo una gran aceptación en el mundo científico, al lograr explicar todo lo relacionado con el movimiento de los cuerpos a velocidades consideradas normales para nuestra escala, así, la materia es considerada como un conglomerado de infinitas partículas que interactúan entre sí, según ciertas leyes

de la física siguiendo las famosas tres leyes de Newton, así se desarrollaron teorías como la estática, la dinámica, la cinemática, entre otras.

Esta forma de ver la materia es la que llamamos clásica, pues posteriormente fueron introducidos conceptos que cambiaron esta concepción, los cuales profundizaremos en el próximo apartado. Nuestros informantes a menudo incurrían en esta forma de ver la materia en sus explicaciones, cuando les preguntamos si la materia podía tener un comportamiento dual, encontramos que todos los informantes se negaron a que existiera un comportamiento ondulatorio de la materia, cuestión que está estrechamente ligada a los modelos enseñados en el colegio, modelos totalmente deterministas en los cuales no pueden caber dos formas de ver la materia, de ahí se encontraron cuestiones como: "No sé si la materia pueda tener forma de onda." (Informante 1), "No, (la materia) solo tendría propiedades corpusculares" (Informante 2), "No, solo en cuando el mar esta agitado puede generar un movimiento ondulatorio en la forma de sus olas." (Informante 3), "No, porque la materia está regida bajo las leyes clásicas, donde todo es determinista." (Informante 4)

De igual manera, cuando se indaga en torno al experimento de doble rendija de Young (1804), se les preguntó a los informantes ¿qué ocurriría si se cambiara la luz láser por una pistola de electrones?, se encontró que el informante 3 se remite al electrón como una partícula material, vista de una manera clásica, obteniendo respuestas tales como "no observaríamos el patrón de interferencia" (informante 3)

Por otro lado, indagando sobre si la materia puede tener un comportamiento dual, se encuentra que todos los informantes se remiten a la materia desde una perspectiva

Newtoniana, como se puede interpretar: “no sé si la materia pueda tener forma de onda” (informante 1), “no, (la materia) sólo tendría propiedades corpusculares” (informante 2), “no, sólo puede ser excitado por una fuente externa para poder moverse de forma ondulatoria, como en el mar” (informante 3), “no, porque la materia está regida bajo las leyes clásicas, donde todo es determinista” (informante 4).

4.5. La materia desde una perspectiva moderna y dual

De Broglie, extrapoló la idea de que la luz puede tener un comportamiento dual a la materia, de esta manera, comenzó a asociar a cada masa con una onda, lo que él llamó un “fenómeno periódico”; tal como se puede interpretar en el siguiente fragmento:

La noción de un cuanto toma un poco de sentido, aparentemente, si la energía está distribuida continuamente en el espacio, pero veremos que esto no es así. Uno puede imaginar que por causa de una meta-ley de la naturaleza, a cada porción de energía con E , se le asocia un fenómeno periódico con frecuencia ν , así encontramos:

$$h \nu = E$$

E , será medida en el marco del paquete de energía. Esta hipótesis es la base de nuestra

teoría: vale tanto como todas las hipótesis, que pueden ser deducidas de sus consecuencias. (De Broglie, 1927, p. 33)[§]

De esta manera, De Broglie (1924) introduce la concepción de que la materia puede tener propiedades ondulatorias, una idea que sigue vigente en las teorías actuales de la física moderna, el informante 1, hizo alusión a esta idea, con la frase: “el hecho de que haya espectador no permite predecir el electrón” (informante 1), donde se refiere a el principio de incertidumbre y como el electrón puede estar en muchos lugares a la vez, por otro lado, cuando preguntamos ¿cómo cambiaría el experimento de doble rendija de Young si se sustituyera el láser por una pistola de electrones? Los informantes 1, 2 y 4, respondieron que no cambiaría, lo que muestra que el electrón puede mostrar un fenómeno que es puramente ondulatorio, como lo es la interferencia: “no cambiaría (el patrón de interferencia)” (informante 2) “no cambiaría, puesto que cuando el electrón (nube de energía) pasa por la rendija, éste toma un comportamiento ondulatorio” (informante 4).

[§] Traducción original realizada por los investigadores del texto *Recherches sur la théorie des quanta* (1924)

4.6. La propagación de la luz en el espacio no refleja comportamientos de onda ni de partícula, solo de rayos de luz.

Es común encontrar concepciones en torno a la luz que no muestran que la luz sea onda o partículas, por lo general en los informantes 1 y 2, que no han tenido un acercamiento a la física de la moderna, estos informantes, por lo general no asocian la luz con algún concepto físico, sino que creen que la luz es un ente apartado de conceptos tales como las ondas o las partículas, en algún momento, dichos informantes usaron una concepción similar a esta para explicar la trayectoria rectilínea de la luz a través del espacio, donde se usa el término “rayo de luz” para mostrar de qué está hecha la luz. Sin embargo esta categoría es considerada en el marco teórico como secundaria, ya que no da aportes significativos al planteamiento del problema.

En resumen, los informantes que no han pasado por el curso de mecánica cuántica (informantes 1 y 2) tienen modelos explicativos en los que la teoría ondulatoria predomina sobre otras teorías, de ahí se observan las imágenes 1 y 2, donde los informantes crean sus propios modelos en torno a los experimentos realizados para que vayan de acuerdo con la teoría ondulatoria de la luz, esto se debe a que los libros de texto y los profesores predominan el modelo ondulatorio al enseñar los fenómenos en torno a la luz, debido a su gran acogida por el mundo, tanto científico como no científico.

Por otro lado, las explicaciones de los informantes tienden a mostrar en primer lugar, una arraigada concepción ondulatoria de la luz, como se observa claramente en la categoría 4.1, esta concepción se encuentra tanto en los libros de texto como en los informantes, mostrándonos cómo éstos siempre acuden a los conceptos de longitud de

onda, frecuencia y oscilación para describir fenómenos asociados a la luz incluyendo los fenómenos que hoy en día son explicados con teorías que toman más en cuenta los modelos de partícula. En segundo lugar se encuentra la dualidad onda – partícula como un concepto fragmentado, en el cual en algunas ocasiones la luz actúa como onda y en otras la luz actúa como partícula, pero no se ve la dualidad como un concepto único, sino como la suma de efectos de onda y partícula, como se observa claramente en la categoría 4.3, en contraposición a la teoría que nos muestra De Broglie (1927) donde la dualidad onda – partícula es una relación de complementariedad donde los modelos ondulatorios y de partícula coexisten para las explicaciones en general del fenómeno de la luz.

Capítulo 5. Implicaciones didácticas

Este capítulo está dedicado a las implicaciones en torno a la enseñanza de la dualidad onda – partícula, tomando como eje fundamental, los problemas encontrados en los informantes en relación con la comprensión de la dualidad.

Es importante reiterar que en esta investigación se encontraron dos problemas fundamentales, el primero va asociado a la predominancia de una concepción ondulatoria de la luz y el segundo se refiere a que cuando los informantes hablan de la dualidad onda – partícula, por lo general lo ven como una suma de efectos de onda y de partícula, en donde no se asume la dualidad como una relación de complementariedad, esta concepción, a juicio de los investigadores, quizás puede ser fruto de la concepción mecanicista que ha predominado en la física, en la cual no se admite que la luz pueda ser onda y partícula al mismo tiempo, el concepto fundamental inmerso en la dualidad onda

– partícula, pues la concepción clave en torno a la dualidad, es el entendimiento de que no todo tiene que ser determinista y que la luz, según las condiciones en las que esté, puede mostrarnos un comportamiento de onda o de partícula y, para los investigadores, esto no debería ser asumido como una contradicción. Por esto se sugiere que los intentos por la enseñanza de este concepto estén enfocados en mostrar la relación de complementariedad planteada por De Broglie (1924), donde se entiende que así como un electrón está distribuido por todo el espacio con una fuerte concentración en un lugar pequeño, y tiene un fenómeno periódico y ondulatorio asociado a él, la luz, que generalmente es considerada onda, siempre tiene unas partículas o fotones que se le asocian y que hacen que esta sea tanto onda como partícula al mismo tiempo.

En este sentido, se retoman los aportes de De Broglie (1924) en el contexto de la enseñanza actual para realizar aportes que permitan un acercamiento a la dualidad de una forma estructurada en 6 sesiones, donde se contempla la construcción de un ciclo didáctico (Gómez et al, 2003) a partir de una pregunta central, que se asume es significativa e interesante para los estudiantes, que requiere un conocimiento profundo del área de estudio y que está centrada según los objetivos que se quieren lograr; además en la estructura se contemplan cuatro fases, que consisten en, indagación, donde se contextualiza al estudiante en torno a los conceptos que se van a abordar y a la utilidad de sus conocimientos previos en torno a dichos conceptos, además de contextualizar al maestro sobre el estado de sus estudiantes para permitir una mejor planeación de las fases posteriores, la segunda fase, que denominamos búsqueda de nuevos modelos explicativos se centra en la organización de los conocimientos previos en pro de la resolución del

problema planteado, además del acercamiento a los estudiantes a los nuevos conceptos y nuevas teorías que permitirán la resolución del problema, la tercera fase, o estructuración de nuevos conocimientos, que consiste en la formalización de los conocimientos obtenidos en las fases anteriores, con el fin de llevar estos conocimientos a un nivel más alto de abstracción y por último, la fase de aplicación a nuevas situaciones problema, donde se busca que los estudiantes trasladen los conocimientos aprendidos a nuevos problemas, favoreciendo así la toma de decisiones y la participación.

5.1. Secuencia Didáctica

Objetivo: Diseñar una secuencia didáctica con base en las precisiones conceptuales que se dieron como resultado de la presente investigación para abordar la dualidad onda – partícula de tal manera que se establezca una relación de complementariedad entre los conceptos de onda y de partícula.

Cabe aclarar que esta forma de abordar la dualidad onda – partícula es sólo una sugerencia que hacen los investigadores a los docentes, mas no una camisa de fuerza o un conjunto de aseveraciones sobre la forma correcta de enseñar dicho concepto. Aparte de esto, también se aclara que la evaluación será integral y se realizará durante todo el proceso.

5.1.1. Pregunta central.

Para concretar el ciclo didáctico, se debe plantear entonces una pregunta central, que en nuestro caso, con base en los dos problemas mencionados anteriormente, sobre el

privilegio que se le da a la teoría ondulatoria y la fragmentación del concepto de dualidad onda – partícula, se plantea la pregunta ¿Cómo abordar el fenómeno de la luz desde una perspectiva dual, que permita establecer una relación de complementariedad entre las concepciones de onda y de partícula?, en donde la finalidad primordial será que los estudiantes entiendan que los conceptos de onda y partícula son considerados equivalentes en la física moderna.

La pregunta planteada obedece a los objetivos de esta investigación, además de que permite una introducción a los estudiantes dentro del mundo de la física moderna, ya que el concepto de dualidad es el primer concepto de muchos en los cuales hay que aceptar la naturaleza probabilística e impredecible de la realidad (Rosenblum y Kuttner, 2010)

5.1.2. Fase de indagación.

En la primera fase, o fase de indagación o exploración, se busca contextualizar lo que se pretende enseñar por medio de indagaciones en torno a los conocimientos previos de los estudiantes, los datos arrojados por esta indagación inicial serán de total utilidad para el diseño de las fases posteriores, en nuestro caso, esta fase de indagación está constituida por un cuestionario KPSI y un cuestionario abierto, en donde se indaga por las concepciones iniciales de los estudiantes en torno a la dualidad onda – partícula, esta fase tendrá una duración de una sesión.

Inicialmente se plantea entonces el cuestionario KPSI (Knowledge and Prior Study Inventory) , (Tamir & Lunetta, 1978) diseñado con el fin de establecer las concepciones previas de los estudiantes en torno a la dualidad onda – partícula, esta actividad se



realizará de forma individual, para que los estudiantes puedan esclarecer sus propias ideas y se tomará un tiempo de 20 minutos para su realización.

Actividad 1 (Cuestionario KPSI)

KPSI

(Knowledge and Prior Study Inventory)

Inventario de Conocimientos Antes de Estudiar

Nombre:

.....

.....

Curso: Fecha 1: Fecha 2:

.....

Indicaciones:

Esta Evaluación inicial tiene como propósito el darse cuenta de algunos aspectos de la Unidad que comenzaremos a trabajar; tus aprendizajes previos, con esa información podremos saber tu punto de partida, para posteriormente saber cuánto hemos aprendido.

Utilizando las categorías siguientes, marca con una X en el recuadro que lo represente.

1 8 0 3



CATEGORÍAS:

| | | | |
|---|--|-------------------|-------------|
| 1. Lo sé y como lo sé lo podría explicar a alguien. | 2. No estoy seguro de saber, no podría explicárselo a alguien. | 3. No entiendo lo | 4. No sé lo |
|---|--|-------------------|-------------|

1. NIVEL CONCEPTUAL

| Planteamientos | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|---|---|---|---|
| La luz como una onda. | | | | |
| La luz como partículas. | | | | |
| La luz con un comportamiento dual. | | | | |
| La materia como partículas. | | | | |
| Las ondas de materia. | | | | |
| La materia con un comportamiento dual. | | | | |

2. NIVEL PROCEDIMENTAL

| Planteamientos | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| Clasificar diferentes tipos de ondas. | | | | |
| Reconocer una función de onda | | | | |
| Identificar las variables que determinan una onda | | | | |
| Calcular resultados utilizando ecuaciones probabilísticas | | | | |
| Relacionar las propiedades ondulatorias y corpusculares | | | | |

3. NIVEL ACTITUDINAL

| Planteamientos | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| Respetar opiniones de mis compañeros. | | | | |
| Escuchar a mis compañeros. | | | | |
| Valorar el entorno natural. | | | | |
| Participar en las actividades propuestas. | | | | |

Comentarios:

.....

.....

.....

Como se observa en el cuestionario, se tienen dos fechas, esto es con el fin de que los estudiantes lo realicen nuevamente al final de este proceso para promover procesos de autorregulación y autoevaluación en los estudiantes.

Luego de aplicado el KPSI, se procede a darle más protagonismo al estudiante con la aplicación de un cuestionario abierto, en donde el estudiante podrá desarrollar sus ideas en torno a los conceptos requeridos para el objetivo de esta secuencia didáctica, además de que se contará con el acompañamiento del profesor, el cual ayudará a que los estudiantes hagan más explícitos sus modelos explicativos, se dará una hora a cada estudiante para la realización de este cuestionario.

Actividad 2

Cuestionario Abierto

El fenómeno de la luz se ha caracterizado por tener varios enfoques en sus explicaciones, por un lado, está la luz como onda y por el otro, la luz como partícula, grandes personajes como Newton, Einstein y Planck han rivalizado sus explicaciones sobre dicho fenómeno, al punto que estas explicaciones pueden resultar incompatibles e incoherentes. El presente trabajo pretende indagar en torno a esas explicaciones que los estudiantes pueden tener en torno al fenómeno de la luz

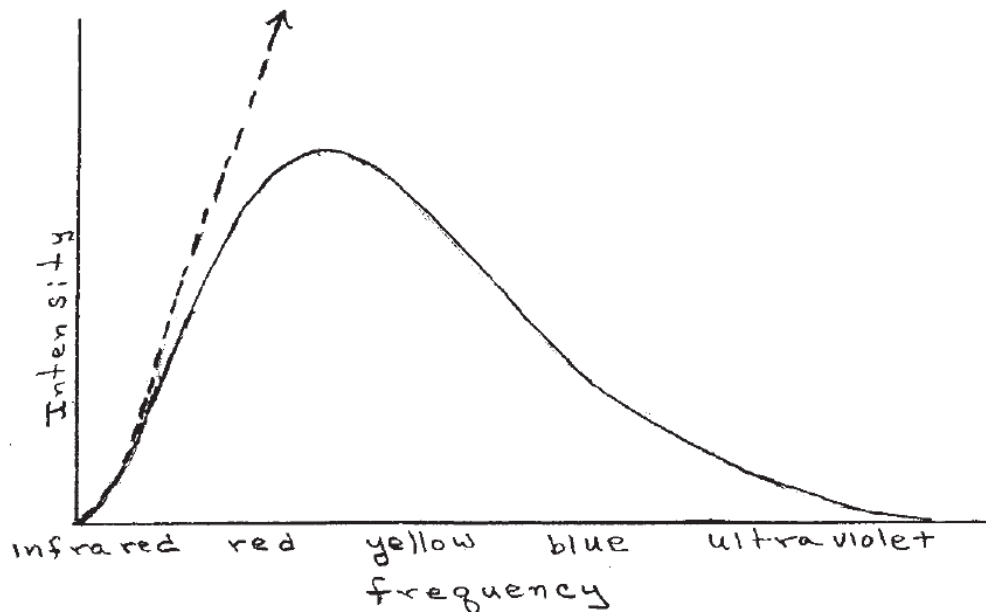
- 1. Explica ¿cómo consideras que es el comportamiento de la luz?, menciona algunos experimentos o fenómenos en los cuales se evidencie este comportamiento.*
- 2. Explica ¿cómo crees que se comportan los fotones o los electrones?, describe algún fenómeno en el cual creas que interaccionan los fotones y los electrones.*
- 3. ¿Crees que la materia puede poseer propiedades tanto ondulatorias como corpusculares? Explica.*

Heisenberg en sus lecturas de Chicago (1930); “Hay dos modelos de los fenómenos cuánticos y ambos conducen a resultados equivalentes. Se puede empezar ya sea del concepto clásico de partícula, o del concepto clásico de onda y arribar esencialmente a la misma teoría cuántica cuantizando la una o la otra. Ya que la existencia de un evento clásico tras la existencia de un evento cuántico, brinda evidencia de la existencia de un mundo que se comporta dualmente, bajo las leyes de la probabilidad y que es compatible con la formalización estructurada”.

4. A partir del párrafo anterior ¿Crees que los conceptos clásicos de onda y partícula son suficientes para explicar el fenómeno de la luz?

5. Realice un esquema en el cual se ilustre cómo crees que se propaga la luz a través del espacio, explica el dibujo con tus palabras.

En la imagen tenemos un gráfico que describe la luz emitida por una barra metálica caliente, a una temperatura dada, tenemos la intensidad para cada frecuencia. La línea punteada describe la predicción clásica del fenómeno usando las ecuaciones de Maxwell y asumiendo que la frecuencia de vibración de los electrones y partículas cargadas en el metal va aumentando mientras aumenta la temperatura, mientras que la línea curva muestra los datos experimentales del fenómeno, a partir de esto, Max Planck construyó una explicación a este fenómeno por medio de la famosa constante de Planck y la h , donde asumió que la luz viene en pequeños paquetes que fueron llamados fotones.



6. *A partir de lo anterior, ¿cómo crees que se explica la línea punteada por medio de la concepción clásica de la luz como onda electromagnética?, ¿cuál es el problema en esta explicación?*

Luego de este cuestionario, se procederá a un conversatorio, donde el profesor escuchará las sensaciones que tuvieron los estudiantes en la realización de las dos actividades, esto con el fin de seguir recogiendo insumos para las fases posteriores de esta secuencia didáctica.

Si se retoman los resultados expuestos en los hallazgos, específicamente en el instrumento 1 de esta investigación, se encuentra claramente el problema de que los estudiantes privilegian una concepción ondulatoria en torno al fenómeno de la luz y, cuando se habla de dualidad, se habla de esta como un concepto fragmentado, donde las propiedades ondulatoria y corpusculares no son relacionadas como lo hace De Broglie en su artículo, es por esto que, con base en estos resultados, asumimos estas respuestas como base para plantear las siguientes fases, todo en torno a los resultados que fueron obtenidos y que serían esperados en contextos similares.

5.1.3. Introducción de nuevos modelos explicativos

La segunda fase, en donde se introducen nuevos modelos explicativos, tiene como fin brindarle un acompañamiento a los estudiantes para que se facilite la organización de las ideas en torno al concepto, además de la incorporación de nuevas ideas, que serán

extraídas del tratamiento que le hace Louis de Broglie a la dualidad onda – partícula. En esta fase se plantean dos prácticas experimentales, la primera, con duración de una sesión (2 horas), está enfocada en el tratamiento de la luz como onda a través del experimento de doble rendija de Young (1804) y la segunda, con igual duración que la anterior, le mostrará a los estudiantes a la luz como partícula a través de una práctica enfocada en el efecto fotoeléctrico y los planteamientos de Planck (1900).

Actividad 3

Actividad experimental

El experimento de Tomas Young o experimento de la doble rendija, fue realizado con el fin determinar el comportamiento de la luz, ya que se discernía si la luz tenía una naturaleza dual o corpuscular, Young demostró que el patrón de interferencia en la luz procedente de una fuente lejana al difractarse por las dos rendijas solo podía ser posible en comportamientos ondulatorios tal como lo estudiaron Hooke y Huygens.

Procedimiento

Se facilitara un equipo de laboratorio que consiste en: Láser, rendijas, pantalla y soportes, el procedimiento consiste en poner las rendijas en el soporte de forma paralela a la pantalla, con una distancia de un metro entre las rendijas y la pantalla, posteriormente, dirigir el láser a las rendijas y observar lo que aparece en la pantalla detrás de las rendijas; el objetivo de la experiencia es que los estudiantes interactúen con

los materiales, de manera que esto les sea de ayuda para explicar cada una de las siguientes preguntas.

1. A partir de la experiencia y la manipulación de los materiales, realice un esquema donde se muestre el fenómeno observado, con tus propias palabras explica el esquema y ¿por qué crees ocurre esto?

2. Explica cómo crees que es la trayectoria de un fotón desde que sale del laser hasta que es colisiona en la pantalla.

3. Como crees que se evidencia un comportamiento dual de la luz en este experimento.

“Un electrón es para nosotros un arquetipo de paquete aislado de energía, donde nosotros creemos, quizás incorrectamente para saber bien, pero por la sabiduría recibida, que la energía de un electrón está distribuida en todo el espacio, con una fuerte concentración en un región muy pequeña, pero además, de estas propiedades no sabemos mucho” (De Broglie, 1924)

4. Si tomamos en cuenta la cita anterior y además si cambiáramos el laser por una pistola de electrones como cambiaran los resultados del experimento. Explica con tus propias palabras.

La relevancia de esta práctica propuesta, viene desde los planteamientos de De Broglie (1924), ya que el experimento de Young, fue el que le dio la estocada final a la teoría de emisión de Newton, que usaba la hipótesis de que la luz se movía en pequeñas partículas, produciendo así toda la teoría ondulatoria que posteriormente James Clerk Maxwell (1865) perfeccionó hasta reducirla a solo 4 ecuaciones, dándole así todo el poderío a la teoría ondulatoria de la luz que sigue funcionando hasta nuestros días; sin embargo, ésta práctica experimental será contrastada con un experimento en torno al efecto fotoeléctrico que es de autoría de los investigadores, en el cual a partir de materiales como láseres, lámparas, sustancias fluorescentes, de fácil adquisición, se plantea un procedimiento en el cual las concepciones ondulatorias no permiten una explicación correcta del fenómeno observado, la explicación que si resulta pertinente es la propuesta por Max Planck(1900) en donde éste sostiene que la luz está compuesta por paquetes de energía o cuantos, volviendo así a una teoría corpuscular para la luz y dándole la posibilidad a De Broglie de construir el concepto de dualidad onda – partícula.

De esta manera, se plantea la segunda actividad experimental, la cual tendrá una duración de 2 horas.

Actividad 4

Actividad experimental.

El efecto fotoeléctrico fue descubierto y descrito por Heinrich Hertz, en 1887, al observar que el arco que salta entre dos electrodos conectados a alta tensión alcanza distancias mayores cuando se ilumina con luz ultravioleta que cuando se deja en la

oscuridad. La explicación teórica fue hecha por Albert Einstein, quien publicó en 1905 el revolucionario artículo “Heurística de la generación y conversión de la luz”, basando su formulación de la fotoelectricidad en una extensión del trabajo sobre los cuantos de Max Planck. Más tarde Robert Andrews Millikan pasó diez años experimentando para demostrar que la teoría de Einstein no era correcta, para finalmente concluir que sí lo era. Eso permitió que Einstein y Millikan fueran condecorados con premios Nobel en 1921 y 1923, respectivamente.

Procedimiento

Se facilitara un equipo de laboratorio que consiste en: material fluorescente, Luz ultravioleta de 365 nm, láser verde de 532 nm, láser rojo de 660 nm, posteriormente, en un cuarto oscuro, se procede a iluminar cada pieza de material fluorescente con un tipo de luz distinto, observando y anotando lo observado; el objetivo de la experiencia es que los informantes interactúen con los materiales, de manera que esto les facilite explicar cada una de las siguientes preguntas.

1. A partir de la experiencia y la manipulación de los materiales, realice un esquema donde se muestre el fenómeno observado y donde se comparte lo sucedido para cada una de las fuentes de luz, con tus propias palabras explica el esquema y ¿por qué crees ocurre esto?

2. Explica cómo crees que es la trayectoria de un fotón cuando sale de alguna de las fuentes de luz hasta que colisiona con el material fluorescente ¿Qué sucede con los átomos en material fluorescente?

3. *Como crees que se evidencia un comportamiento dual para la luz en esta experiencia.*

Los fotones del rayo de luz tienen una energía característica determinada por la frecuencia de la luz. En el proceso de fotoemisión, si un átomo absorbe la energía de un fotón, el átomo es llevado a un estado excitado en el cual emite fotones.

4. *A partir del párrafo anterior y la experiencia, explica con tus propias palabras ¿cómo crees que el átomo absorbe la energía del fotón?*

En ambas actividades, el papel del maestro es fundamental para acompañar correctamente a los estudiantes en sus primeros acercamientos a estos nuevos conceptos, el profesor debe inducir a sus estudiantes a la utilización de la luz como onda o como partícula, según sea el caso, para la resolución de los problemas planteados.

5.1.4. Estructuración de nuevos conocimientos

Hasta ahora se les ha mostrado a los estudiantes las concepciones de onda y de partícula de una manera separada, en dos sesiones distintas, esta fase está centrada en la integración de ambas concepciones en una sola, para esto se encuentran las estrategias metacognitivas, que permiten un nivel de abstracción superior, pues para la metacognición se necesita el conocimiento sobre las capacidades cognitivas y la regulación de estas capacidades cognitivas (Campanario et al, 2000), de esta manera, las estrategias resultan de gran importancia en esta fase para que los estudiantes puedan relacionar correctamente las dos perspectivas que se piden relacionar.

Concretamente, durante una sesión de clase (dos horas), se utilizarán dos estrategias, en primera instancia el cuadro comparativo, en donde los estudiantes deben comparar la perspectiva ondulatoria con la corpuscular, en términos de sus similitudes, diferencias, su utilidad, entre otras características que permitan que los estudiantes encuentren una primera relación entre las dos concepciones, para esto se tendrán 40 minutos y se debe hacer en parejas, con acompañamiento del profesor, posteriormente, se aplicará la segunda estrategia, que será el debate argumental, en donde se dará un debate con moderación del profesor, en el cual se espera que los estudiantes argumenten sus respuestas en torno al problema de la dualidad, con base en la pregunta de ¿cómo puede ser la luz onda y partícula al mismo tiempo?, donde el profesor, a través de la epistemología y la cosmovisión fenomenológica, brindará argumentos que permitan a los estudiantes abandonar la lógica mecanicista de la física y adoptar una nueva física en la cual la luz se vea como onda y partícula en su conjunto.

5.1.5. Aplicación a nuevas situaciones problema

Luego de la estructuración de los conceptos por parte de los estudiantes, se procede a aplicar dichos conocimientos a nuevas situaciones problema, en donde se espera que los estudiantes muestre un manejo integral de la dualidad onda – partícula, para esto, en una sesión, se plantea la realización de un texto en el cual se relacionen 4 palabras fundamentales para los objetivos de este ciclo didáctico, estas palabras son: materia, luz,

onda y partícula. Para la realización de este texto, tendrán dos horas enteras y podrán completarlo en casa, con la idea de que a la siguiente sesión se llegue con el texto completo.

En dicho texto se espera que los estudiantes tengan ideas argumentativas que muestren una profunda relación entre la concepción ondulatoria y la concepción corpuscular, para posteriormente, en la segunda sesión de esta fase, realizar una actividad que consiste en una simulación del efecto fotoeléctrico, donde los estudiantes podrán interactuar en torno a un experimento que requiere de materiales muy costosos y que resultan de difícil consecución, esta simulación estará acompañada de una serie de preguntas que tendrán que ser respuestas por los estudiantes en el marco de la mecánica cuántica.

Actividad 5. Ingrese al link que aparece a continuación para descargar la simulación en PhET, posteriormente, diligencie la siguiente guía.

<https://phet.colorado.edu/es/simulation/legacy/photoelectric>

Laboratorio sobre el efecto fotoeléctrico.

Se usará el laboratorio PhET sobre el efecto fotoeléctrico para explorar lo que sucede cuando la luz interactúa con la materia. El efecto fotoeléctrico ocurre cuando la luz golpea una superficie y libera electrones.

Observaciones iniciales – Abre la simulación PhET sobre el efecto fotoeléctrico, antes de empezar a mover algo, responde las preguntas a continuación:

1) Antes de empezar, ¿qué pasará con...?

a) La superficie metálica cuando la luz la golpee

b) *La luz cuando se mueve el deslizador de la intensidad*

2) *¿Crees que todas las intensidades de luz podrán liberar electrones? Explica*

3) *¿Crees que todas las longitudes de onda podrán liberar electrones? Explica.*

Parte 1 – Introducción al efecto fotoeléctrico

1) *Que podrías cambiar en la simulación*

2) *Selecciona un metal para estudiar. Desarrolla un procedimiento para determinar las características de la luz necesaria para liberar electrones del metal, escribe el proceso que realizaste y tus conclusiones aquí.*

3) *Con base en el metal que escogiste, responde las siguientes preguntas*

a) *¿Cuál es la longitud de onda mínima para remover electrones?*

b) *¿qué longitudes de onda son las más efectivas?*

c) ¿qué cambia la intensidad?

Parte II – encontrando un modelo para el efecto fotoeléctrico

4) Describe las tres gráficas que se pueden ver en la simulación, en la tabla a continuación:

| Gráfica | Relación (inversa o directa) | Explicación (usando términos físicos) |
|--|------------------------------|---------------------------------------|
| Corriente vs. Voltaje en la batería | | |
| Corriente vs. intensidad de la luz | | |
| Energía de los electrones vs. Frecuencia de la luz | | |

5) Proponga una ecuación matemática para el efecto fotoeléctrico usando los conceptos de función trabajo, luz incidente y energía máxima de los electrones. Use la simulación para verificar tu modelo y realice una gráfica de la energía máxima de los electrones vs frecuencia de la luz.

Metal seleccionado: _____



| <i>Longitud de onda (nm)</i> | <i>Frecuencia (Hz)</i> | <i>Potencial de frenado (V)</i> | <i>Energía de los electrones (eV)</i> |
|----------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|---|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

III Conclusión

En dos o tres párrafos, explica tu entendimiento del efecto fotoeléctrico, incluye una discusión sobre:

- Intensidad y longitud de onda de la luz incidente*
- El modelo ondulatorio y por qué no es útil en esta experiencia.*

Capítulo 6. Consideraciones finales

Esta investigación fue planteada con el fin de responder una pregunta en torno a cómo se podría resignificar la dualidad onda – partícula mediante los planteamientos de Louis de Broglie y de 4 informantes de los cursos de física de la luz y mecánica cuántica de la Universidad de Antioquia. Al respecto durante el proceso investigativo surgieron aspectos de gran interés como los siguientes:

En primer lugar, se encontró una bella forma de ver la ciencia por parte de Louis de Broglie, quien anecdóticamente, se remitía en variadas ocasiones a la historia y epistemología de las ciencias para dar solución al problema de la dualidad, de esta manera es como él llegó a establecer una relación de complementariedad que pudimos visualizar en su obra, una relación de equivalencia entre los conceptos de onda y partícula que puede ser extrapolada a cualquier rama de la física y que resulta de total utilidad para entender el gran cambio paradigmático que se dio con el surgimiento del concepto de la dualidad onda – partícula, pues los conceptos en sí mismos no son tan importantes, sino entender que la luz no está determinada en ninguna ocasión y que puede ser tanto onda como partícula al mismo tiempo, es un salto epistemológico que le dio surgimiento a toda la física moderna, en donde ya los conceptos no son duales, sino que existen infinitud de resultados para un experimento dado.

En segundo lugar, el análisis de las explicaciones de los informantes nos dio un sinnúmero de elementos que nos permitieron entender cómo es que se construye el conocimiento científico, pues encontramos que nuestros informantes construían explicaciones con los conceptos que tenían más claros, que por lo general era la concepción ondulatoria de la luz, explicaciones que eran de su propia autoría y que constituían un modo de explicar acorde con los fenómenos que observaban, sin embargo estas explicaciones no coincidían con las explicaciones establecidas para la dualidad onda partícula, sino que son el producto de una concepción realista que ha estado afianzada en la ciencia desde los mismos inicios de esta, en dicha concepción realista no hay lugar para dos explicaciones de un mismo fenómeno (onda y partícula) y esto fue algo que se notó totalmente en los dos problemas fundamentales encontrados en las concepciones de los informantes; el primero, que estos privilegian una concepción ondulatoria de la luz, debido a la importancia de dicha teoría y a un sinnúmero de pruebas experimentales que son explicadas con ella y, en la segunda postura, cuando los informantes se refieren a la dualidad, hablaban de la concepción de onda por un lado y de la concepción de partícula por el otro, y según los planteamientos de estos, no fue posible establecer algún tipo de articulación entre ambos conceptos, postura de acuerdo con la cosmovisión realista, la cual no permite una articulación entre dichos conceptos.

En tercer lugar, cuando nos planteamos el problema de la re-significación en el contexto educativo actual, encontramos la cosmovisión fenomenológica como una alternativa que permite la coexistencia de dos explicaciones para un mismo

fenómeno, de esta manera, pudimos resaltar la importancia del uso de la historia y epistemología de las ciencias en la enseñanza, por esto, se decide dedicar esta última parte de la investigación a ciertas precisiones referidas al papel de la historia y la epistemología de la ciencias en la enseñanza y el trabajo investigativo en la escuela. Consideramos que los resultados de esta investigación nos motivan para hablar de estos temas, ya que más que quedarse en el papel, los resultados de las investigaciones deben transformar la realidad escolar, al igual que las prácticas docentes. Por otra parte, resulta apropiado decir que, el desarrollo científico y el conocimiento aumentan con el transcurrir del tiempo y se van adecuando a las rutinas y tradiciones de la escuela, y a veces pareciera que sucede sin que se haga una reflexión sobre los asuntos relacionados con la enseñanza y el aprendizaje. Desde nuestra práctica docente hemos visto como, al parecer, la construcción del conocimiento científico es competencia sólo de organismos especializados tales como: las universidades y grupos de investigación; los cuales formulan artículos de revistas que llenan las bases de datos y que dan prestigio y nombre a los autores que los escriben; contrario a esto, planteamos que la producción de conocimiento debe posibilitar a los docentes reflexionar frente a las problemáticas que atraviesan el contexto escolar, y en tal sentido, estas producciones no deben quedarse en los anaqueles de las bibliotecas sino permear a los contextos educativos.

En este sentido, se plantea a la ciencia como un sistema cultural (Elkana, 1983), en el marco de una perspectiva fenomenológica, en donde interfieren diferentes factores socio-culturales, tales como los políticos, económicos, sociales, tecnológicos, entre

otros factores que difieren según la región, así, la educación científica debe variar según el contexto educativo, pues el mismo conocimiento científico fue construido en uno de estos contextos socio-culturales, en donde era interpretado según la carga teórica de cada uno de los habitantes del tiempo y el espacio en el cual fue concebido dicho conocimiento, entendiendo a la carga teórica como todo el conjunto de conocimientos culturales que permiten la creación de una visión del mundo, a través de unos lentes forjados en cada cultura, dichos lentes son la propia carga teórica que permea claramente toda la producción científica.

Entender esta problematización socio-cultural, implica entender que en la ciencia también inciden aspectos humanos y que desde la enseñanza de la física también podemos transformar sujetos según las necesidades del contexto, impartir la enseñanza de la ciencia es educar a ciudadanos integrales, reflexivos, críticos, estratégicos, activos, consecuentes, responsables, por medio de la inclusión intencionada de las directrices teóricas y metodológicas de la naturaleza de las ciencias (en especial la historia y filosofía de las ciencias).

En primer lugar, se debe comprender la ciencia como una actividad humana y el conocimiento científico como una labor colectiva que depende de las construcciones sociales. Así, la ciencia es una tentativa de cómo se entiende el mundo, y resulta pertinente preguntarse por ¿Cuáles son los potenciales beneficios de la incorporación de la historia y epistemología de las ciencias, en la enseñanza de la física?

Muchas veces se ha pensado el problema de la enseñanza en el contexto de la enseñanza misma, donde por lo general el discurso se agota en reflexiones que quedan en hechos teóricos de difícil aplicación práctica, es por esto que nos remitimos a la epistemología, más específicamente, a las cosmovisiones epistemológicas para reflexionar en torno a la enseñanza, pues la manera en la cual se vea el mundo es determinante a la hora de reflexionar en torno a la enseñanza. Es así como se plantean las cosmovisiones realista y fenomenológica, dos maneras de ver el mundo que permiten hacerse preguntas tales como ¿qué es la ciencia?, ¿qué es la realidad?, ¿cuál es el papel del sujeto en la experimentación?, ¿Cuáles son las relaciones causa – efecto?, entre otras, preguntas que aterrizadas en cada cosmovisión dan elementos para pensarse los problemas de la enseñanza.

De manera breve, se puede decir que la cosmovisión realista concibe un mundo natural independiente del sujeto, donde los objetos y fenómenos se encuentran en un escenario externo al observador, toda persona que investigue dicho mundo natural llegará a las mismas conclusiones si sigue el método científico de manera correcta, donde el método científico es un conjunto de reglas y formas de pensar que sirven para desvelar lo que está escondido en la naturaleza, en este orden de ideas, el papel de la ciencia dentro de la cosmovisión realista es el de la herramienta que sirve para desenmarañar los entramados de la naturaleza.

Por otro lado, en la cosmovisión fenomenológica, se parte de la premisa de que no se puede llegar a conocer la naturaleza tal como es, o el estado puro de la naturaleza, en donde la ciencia como una actividad humana permite hacer representaciones en torno a

los fenómenos de la naturaleza. Cuando se observa un árbol desde una cosmovisión fenomenológica, lo que se llama árbol es la representación de la interacción que genera el sujeto con el árbol, si se quisiera conocer el árbol en su estado puro, se tendría que eliminar toda la carga teórica que tenga cada sujeto, pues dicha carga teórica, que difiere en cada persona, es la que hace que al ver un árbol se genere una interacción sujeto – árbol, así, un hombre puede ver al árbol como una planta, mientras que otro lo puede ver como su alimento o su material de construcción, sin embargo, con el paso del tiempo se ha llegado a un consenso cultural en torno a la palabra árbol y dicho consenso entra en la carga teórica de cada sujeto. (Aguilar, 2006)

Es por esto que la premisa de que no se puede llegar a la naturaleza tal como es cobra sentido, pues lo que el sujeto ve está atado a su carga teórica, de la cual es difícil sustraerse.

Así se encuentran dos formas de significar la naturaleza, una naturaleza realista, externa al sujeto y donde la ciencia toma un papel de herramienta; y una naturaleza construida por tentativas de realidad, donde el sujeto toma un papel protagónico dentro de la ciencia y donde la ciencia en si se convierte en la interpretación humana de la naturaleza.

Profundizando en la mirada de la ciencia en cada cosmovisión, se encuentra que en los inicios de la física, el hombre estaba convencido de poder llegar a la esencia de las cosas, el estado puro de cada objeto, esta concepción promovida por personajes de la talla de Galileo y Newton es la llamada mecanicista, en donde el fin último de la investigación científica es llegar a las causas primordiales de los fenómenos naturales, es así como

Newton fundamenta todo su estudio de la naturaleza en el concepto de fuerza, donde la causa de todo movimiento se debe a una fuerza.

Sin embargo, esta concepción newtoniana de la realidad, traía consigo problemas como el de la acción a distancia en la fuerza gravitacional, ya que debía existir un mecanismo de contacto por el cual actuara la fuerza, es así como se creó el llamado éter, que unía a la causa con el efecto. En torno al éter comenzaron a surgir preguntas como ¿cuál es la causa del éter?, donde los mecanicistas tuvieron problemas que llegaron hasta las mismas bases de la física.

Todo este embrollo del éter hizo que los científicos de la época se vieran incapaces de continuar buscando la esencia de las cosas, por lo cual se llegó a que una buena forma de resolver problemas es describiendo las relaciones entre los sucesos, donde el objeto de la ciencia cambia de ser la esencia de los fenómenos para ser las relaciones entre objetos. Allí es donde se comienza a plantear la cosmovisión fenomenológica, en este sentido, la causalidad deja de ser unidireccional para pasar a verse como una función matemática, donde existe una interdependencia entre fenómenos y donde los efectos pueden ser causas y las causas efectos. (Matthews, 1994)

En este nuevo enfoque, el estudio de la naturaleza se hace por medio de la interdependencia de los sistemas, se estudian las relaciones entre sistemas, donde cada sistema es delimitado según las necesidades del investigador, se buscan las variables en los sistemas y se establecen relaciones entre estas, para pasar a nombrar dichas relaciones, las cuales serán validadas por la comunidad científica posteriormente.

Aplicando este análisis al contexto educativo, se puede observar que un maestro en la cosmovisión realista tendría una concepción totalmente bancaria de la educación, donde su papel sería el de transmitir una serie de conocimientos incuestionables, el papel del alumno es el de un receptor memorístico que no tiene condiciones para apelar a las verdades absolutas que transmite el maestro, y además, el contexto sociocultural no importa, pues el conocimiento realista es válido en cualquier parte y en cualquier momento en el mundo. Por otro lado, un maestro fenomenológico se encarga de construir conocimiento en el contexto sociocultural en el que se encuentre, para que dicho conocimiento sea validado a través de la re-contextualización de las teorías que han sido construidas por otras personas en distintos lugares del mundo.

6.1. La historia y la epistemología en el cambio paradigmático de la física clásica a física moderna.

Desde la época del renacimiento, dentro de los grandes pensadores de la ciencia, comenzó a surgir la llamada pregunta por el conocimiento, la cual le da un carácter epistemológico a la ciencia, pues dicha pregunta lleva a otras preguntas fundamentales, tales como la pregunta sobre el objeto de la ciencia, el método, las explicaciones sobre la naturaleza, los fundamentos, la concepción de verdad, entre otros.

Inicialmente, el hombre se preocupaba por la extensión de la ciencia, el interés estaba en desenmarañar la totalidad de la naturaleza y no en profundizar en torno a las explicaciones que se le daban a los fenómenos, en este sentido, la pregunta por el conocimiento carece de importancia, pues se pensaba que la ciencia y sus teorías estaban

determinadas por la realidad, una realidad inmutable y exterior al humano, en donde no cabía preguntarse por los fundamentos o las explicaciones sobre la naturaleza. Cuando surgió la pregunta, inicialmente se plantearon dos rutas, la primera era por el objeto de la ciencia y la segunda por el método, estas rutas epistemológicas arrojaron rápidamente buenos resultados, personajes como Galileo y Newton construyeron sus teorías basados en las nuevas concepciones de ciencia que surgieron con base en el cambio de mentalidad que se dio en su época, en sus obras se plasma una materialización de lo que ellos asumen por conocimiento, es decir, la manera en la que se asume el conocimiento es la que guía la investigación científica, concepción contraria a la anterior, donde la supuesta realidad inmutable era la que guiaba a la ciencia en su empresa de revelar las leyes fundamentales de la naturaleza. (Cassirer, 1979)

Así, la concepción que se tenga del conocimiento determina la manera de hacer ciencia, pero también determina una manera de explicar, además de lo que se asume por verdad, pues la ciencia se convierte en un sistema cultural, donde se deben validar las teorías por una comunidad científica, por lo cual, la verdad se encuentra en manos de terceros y así se regresa al inicio de este ciclo, pues la forma de asumir la verdad genera maneras de proceder, o métodos para producir conocimiento validable, a su vez, los fundamentos de la ciencia cambian, y ya la ciencia no es sustentada en la experiencia, sino que es sustentada en constructos teóricos, donde la teoría precede a la experimentación.

Con estos elementos, la ciencia comienza a tomar un carácter más humano y más amplio, pues ya no se toma como un simple conjunto de resultados sobre la realidad, sino

que es una estructura compleja que contiene unos fundamentos, unas reflexiones sobre el método, unas maneras de explicar y otros elementos que van edificando y van dando rumbo a las cosmovisiones que el humano toma con respecto a las realidades.

Por esto, la naturaleza comenzó a revelar nuevos rasgos y la profundización sobre las explicaciones emprendió un crecimiento exponencial; sin embargo, no se debe caer en el error de mezclar la teoría del conocimiento con la investigación de la naturaleza, sin embargo, la teoría del conocimiento es la que guía a la investigación de la naturaleza, dando maneras de formular preguntas y de proceder en la construcción de las teorías modernas, estos elementos muestran una cara humanista de la ciencia.

Con el paso del tiempo, la concepción epistemológica del conocimiento comenzó a asentarse y dentro de las investigaciones científicas surgieron problemas con un carácter epistemológico, esto obligó a los científicos a pensar en la pregunta por la ciencia, pregunta cuyo estudio se consideraba únicamente pertinente en el campo de la filosofía, esto ahondó aún más las reflexiones en torno a los fundamentos. (Matthews,1994)

Con base en estos últimos problemas que surgieron en torno a pensarse los fundamentos, se generó otra discusión en torno a las posibilidades de la ciencia, pues la ciencia dejó de ser todopoderosa desde que su objeto y sus fundamentos cambiaron, haciendo que a su vez, las explicaciones sobre el mundo cambien, uno de estos nuevos problemas generó toda una revolución que desencadenó en el nacimiento de la física moderna, cuando el hombre entendió que nunca habrá un instrumento lo suficientemente preciso para medir la posición y la velocidad exacta de una partícula en un instante dado, es cuando murió la idea de que se puede desenmarañar la naturaleza, explicar cada uno de

sus fenómenos y llegar a la esencia de las cosas, por este y otros problemas más, es que murió el llamado mecanicismo.

Este proceso de cambio en la forma de ver el mundo se realizó de forma gradual, inicialmente la ley de la causalidad, donde todo efecto debía tener una única causa era la que regía todas las explicaciones sobre la naturaleza, así, la única manera de explicar los fenómenos era de forma mecánica, basándose en la teoría de Newton, donde la fuerza era un concepto estructurante de todas las concepciones sobre la realidad. En esta forma de ver el mundo, se ve que dentro de los fundamentos de la ciencia existen constructos teóricos tales como la fuerza, esto se puede considerar como un asomo de la nueva forma de ver el mundo, pues estos constructos teóricos introducen un sutil toque de subjetividad en las explicaciones generales sobre la naturaleza.

Posteriormente, la ley de la causalidad comienza a mostrar falencias con el problema del éter, pues las causas del éter resultaban sumamente escurridizas para los científicos, así, comienza a verse la causalidad como una función matemática, donde las causas pueden ser efectos y los efectos pueden ser causas, por esto, se asume la interdependencia de los fenómenos y la jerarquía entre fenómenos deja de existir, por lo cual, no debe existir una causa única que hace funcionar el mundo.

De esta manera es como comienza el siglo XIX, donde Lord Kelvin (1901), en el marco de una cosmovisión realista, realiza la siguiente aseveración:

La física es un conjunto perfectamente armonioso y en lo esencial acabado, en el que sólo veo dos pequeñas nubes oscuras: el resultado negativo del experimento de Michelson y Morley, y la catástrofe ultravioleta en la explicación de la radiación del cuerpo negro (p. 303)

Esas dos pequeñas nubes oscuras sólo pudieron ser resueltas abandonando los principios de causalidad y abandonando la cosmovisión realista, por medio de una nueva forma de ver el mundo, en donde el resultado negativo del experimento Michelson y Morley, que precisamente surgía del problema de cómo la tierra se mueve a través del éter, fue explicado de una manera brillante por Albert Einstein (1905) dando así surgimiento a la ciencia de la relatividad y el segundo problema, de la catástrofe ultravioleta, fue resuelto por Max Planck (1900) con la hipótesis de los cuantos, lo que dio surgimiento a toda la teoría de la mecánica cuántica y dentro de ella, específicamente a la dualidad onda – partícula.

Es por esto, que resulta totalmente necesario un abordaje histórico y epistemológico de los conceptos en mecánica cuántica, con el fin de que se entienda la ciencia como una construcción humana y resulte más sencillo para el estudiante la construcción y el entendimiento de sus propios conceptos, basándose principalmente en las maneras de hacer ciencia que nos muestran los teóricos en sus escritos, por medio de la resignificación de cada concepto en el contexto actual.

7. Referencias bibliográficas

- Aguilar, Y. (2006). *Enseñanza y formalización de los fenómenos físicos. Uso de la historia y la epistemología de la física en la educación en física. El concepto de presión desde la perspectiva euleriana*. Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia.

- Arons, A.B. (1990). *A guide to introductory physics teaching*. Nueva York: John Wiley.
- Briggs, J., Peat, D., (1989). *A través del maravilloso espejo del universo*. Barcelona: Gedisa Ed.
- Campanario, Juan Miguel y Otero, José C. (2000) Más allá de las ideas previas como dificultades de aprendizaje: las pautas de pensamiento, las concepciones epistemológicas y las estrategias metacognitivas de los alumnos de ciencia. *Enseñanza de las ciencias*, 18 (2), 155 – 160
- Cassirer, Ernst. (1979) *El Problema del Conocimiento*. México: Fondo de cultura Económica.
- De Broglie, L. (1963). *Recherches sur la théorie des quanta* (pp. 40-44). Paris: Masson.
- Einstein, A. (1905). Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz. *Annalen der Physik*, 17, 132-148.
- Elkana, Y. (1983). La ciencia como sistema cultural: una aproximación antropológica. *Boletín de la sociedad colombiana de epistemología*, 3(10-11), 65-80.

- Feynman, R. P., & Leighton, R. B. S. (1971). *The Feynman lectures on physics* (No. 53 FEY).
- Fischler, H., & Lichtfeldt, M. (1992). Modern physics and students' conceptions. *International Journal of Science Education*, 14(2), 181-190.
- Gil Pérez, D., Senent Pérez, F., & Solbes Matarredona, J. (1986). Análisis crítico de la introducción de la física moderna en la enseñanza media. *Revista de Enseñanza de la Física*, 2(1), 16-21.
- Gómez, A., Sanmartí, N., & Pujol, R. (2003). Aprendiendo sobre los seres vivos en su ambiente. Una propuesta realizada en la escuela primaria. *Aula, Innovación Educativa*, 125, 54-58.
- Greca, I. y Herscovitz, V. (2002) Construyendo significados en mecánica cuántica: Fundamentación y resultados de una propuesta innovadora para su introducción en nivel universitario. *Enseñanza de las ciencias*, 20 (2), 327-338.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2003). *Metodología de la Investigación*. México: Editorial Mc Graw-Hill.
- Heisenberg, W. (1930). *Die physikalischen prinzipien der quantentheorie* (Vol. 1). Leipzig: S. Hirzel.

- Kelvin, L. (1901). I. Nineteenth century clouds over the dynamical theory of heat and light. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 2(7), 1-40.
- Thomas S. Kuhn (1969). *Estructura de las Revoluciones Científicas*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Matthews, M. R. (1994). Historia, filosofía y enseñanza de las ciencias: la aproximación actual. *Enseñanza de las Ciencias*, 12(2), 255-277.
- Levy-Leblond, J. M. (2003). On the Nature of Quantons. *Science of Education*, 12, 495-502.
- Maxwell, James (1865), A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 155: 459–512, United Kingdom.
- Montoya, I., Montoya, A. (2002) El Nuevo paradigma de las ciencias y la teoría de gestión. *Innovar* 12 (20), 17-34.
- Newton, Isaac. (1687) *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, Londres: Cambridge University.

- Ostermann, F., Moreira, M. (2000) Física contemporánea en la escuela secundaria: una experiencia en el aula involucrando formación de profesores. *Revista enseñanza de las ciencias* 18(3), 391-404.
- Planck, Max (1900) *On the Theory of the Energy Distribution Law of the Normal Spectrum*. Berlin: Pergamon Press.
- Reese, R. (2002) *Física universitaria*. México: Tomson.
- Reisman, R., Holliday, D. y Krane, K. (2005) *Física*. México: Compañía editorial continental.
- Rosenblum, Bruce y Kuttner, Fred. (2010). *El enigma cuántico. La física, al encuentro de la conciencia*. España: Tusquets editores.
- Sampieri, R. H., Collado, CF. Y Baptista, Ma. P. (2010). *Metodología de la investigación*, México: McGrawHill,
- Sears, F. W., Zemansky, M. W., Young, H. D., & Freedman, R. A. (2004). *Física universitaria vol. 2*. México: Pearson.
- Segura, A., Nieto, V y Segura, E (2012). Un análisis profundo del fenómeno de dualidad onda – partícula para la comprensión del mundo cuántico. *Latin American Journal of Physics Education* 6(1) 137 – 142.

- Serway, R. y Jewett, J. (2005). *Física para ciencias e ingeniería*. México: Tomson.
- Sinarcas, V., & Solbes, J. (2013). Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la Física Cuántica en el bachillerato. *Enseñanza de las Ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 31(3), 9-25.
- Solbes, J; Calatayud, M; Climent, J y Navarro, J (1987) Errores conceptuales en los modelos atómicos cuánticos. *Enseñanza de las ciencias*, 5 (3), 189-195.
- Stake, Robert E. (1999). *Investigación con estudio de casos*. Madrid: Ediciones Morata.
- Tamir, P.; Lunetta, V.N. (1978). An analysis of laboratory activities in the BSCS Yellow version, *American Biology Teacher*, 40, 426-428.
- Young, Thomas. (1804) *The Bakerian Lecture: Experiments and Calculations Relative to Physical Optics*, Londres: Royal Society.