



**UNIVERSIDAD PEDAGOGICA
NACIONAL**

Educadora de educadores

**Construcción de una base fenomenológica sobre la interacción
luz - materia como introducción a la mecánica cuántica**

Departamento de Física

Maestría en Docencia de las Ciencias Naturales

2021

**Construcción de una base fenomenológica sobre la interacción luz - materia como
introducción a la mecánica cuántica**

Carlos Germán Cortés Hernández

Universidad Pedagógica Nacional

Facultad de Ciencia y Tecnología

Maestría en Docencia de las Ciencias Naturales

Bogotá D.C.

2021

**Construcción de una base fenomenológica sobre la interacción luz - materia como
introducción a la mecánica cuántica**

Carlos Germán Cortés Hernández

Trabajo de grado como requisito para optar al título de:

Magister en Docencia de las Ciencias Naturales

Directores: M.Sc. José Francisco Malagón Sánchez

M.Sc. Sandra Sandoval Osorio

M.Sc. Juan Alberto Aldana González

Grupo de Investigación

Estudios histórico críticos y enseñanza de las ciencias

Universidad Pedagógica Nacional

Facultad de Ciencia y Tecnología

Maestría en Docencia de las Ciencias Naturales

Bogotá D.C.

2021

Agradecimientos

A lo largo del desarrollo de este trabajo de investigación debo agradecer a aquellos que siempre me motivaron y aportaron no solamente en mi formación profesional sino como persona y ellos son:

En primer lugar, a mi familia, en especial a mí hija que le adeudo momentos de compartir, jugar, pero que a parte del trabajo realizado es y soy un ejemplo para ella de cumplir los sueños. A mi esposa, que fue mi apoyo en los momentos difíciles, pero que siempre con su sonrisa y amor me acompaña y es el plus para lograr llegar a buen puerto.

En segundo lugar, a mis asesores Sandra, Francisco y Juan que siempre con su paciencia, sabiduría y ejemplo, me orientaron y me formaron en el camino de la investigación abriendo un sin número de posibilidades en las maneras de dialogar con la naturaleza y continuar buscando nuevas formas de enseñar ciencias y mejorar los procesos de enseñanza y aprendizaje en los estudiantes.

En tercer lugar, a mis estudiantes que siempre estuvieron dispuestos a participar de esta investigación y que, con sus participaciones, explicaciones hicieron parte de los resultados, las reflexiones y conclusiones presentadas en este trabajo.

Finalmente, a mi universidad, a los profesores de la Maestría en Docencia de las Ciencias Naturales, porque cada uno de ellos, aportaron y colocaron un granito de arena en la inmensidad del conocimiento construido.

“para todos los efectos, declaro que el presente trabajo es original y de mi total autoría: en aquellos casos en los que he requerido del trabajo de otros autores o investigadores, he dado los respectivos créditos”

Resumen

La ausencia de la actividad experimental en la enseñanza de la mecánica cuántica es uno de los escenarios bajo los cuales este trabajo de investigación presenta una propuesta de aula que dirime la dicotomía entre experimento y teoría sobre el fenómeno de interacción de la luz con la materia, en la cual se construye una base fenomenológica que permite organizar actividades experimentales de manera intencionada, generando un campo de efectos, de los cuales se construye relaciones y lenguajes que amplían la experiencia de estudiantes del Colegio Parroquial Confraternidad de la Doctrina Cristiana en Bogotá.

Las actividades experimentales se estructuran, considerando la absorción de la luz en su interacción con la materia, dando lugar a establecer relaciones entre la frecuencia y la energía asociada a la radiación electromagnética y que permite que la luz se transforme en su naturaleza electromagnética. Finalmente, esto sirve de base para organizar la comprensión del comportamiento dual de la luz en la organización del experimento de la doble rendija.

Palabras claves: Actividad experimental, base fenomenológica, efecto fotoeléctrico, cuanto, interacción, luz y materia.

Tabla de Contenido

1	Contexto problemático y metodología de investigación	12
1.1	Planteamiento del problema	14
1.2	Justificación	17
1.3	Pregunta problema	19
1.4	Objetivo general	19
1.5	Objetivos específicos	19
1.6	Metodología	20
1.7	Dificultades de la enseñanza de la mecánica cuántica	23
1.8	Virtudes en la enseñanza de la interacción luz - materia como entrada a la mecánica cuántica en la escuela media.	24
2	Fenómeno de interacción de la luz con la materia – Una recontextualización	28
2.1	La interacción de la luz ultravioleta con los metales.	30
2.1.1	Las descargas eléctricas debidas a la interacción de la luz con la materia . .	31
2.1.2	El electroscopeo y la luz ultravioleta	35
2.2	El papel de la energía en la interacción de la luz con la materia y su relación con la radiación natural	38
2.2.1	Ley de distribución de Planck: el problema del equilibrio entre radiación y materia	40
2.3	El problema de emisión de electrones y la intensidad de luz	46

2.4 La comprensión de la naturaleza dual de la materia como base en la formalización de la interacción de la luz con la materia	55
2.5 Consideraciones en la introducción a la enseñanza de la mecánica cuántica	63
3 La perspectiva fenomenológica como ruta en la introducción a la mecánica cuántica	66
3.1 La observación y el papel de la percepción.	67
3.2 Perspectiva fenomenológica	70
3.3 La base fenomenológica	73
3.3.1 Organización de los fenómenos	74
3.3.2 Caracterización de cualidades y construcción de una magnitud	75
3.4 Los procesos de formalización	78
3.5 El experimento en la enseñanza de las ciencias como construcción de fenomenologías	79
4 Construcción de la base fenomenológica sobre la interacción de la luz con la materia	83
4.1 Diseño de la propuesta de aula.	84
4.1.1 Etapas e intención de la propuesta	85
4.2 Implementación de la propuesta de aula	92
4.2.1 Actividad I: La absorción de la luz natural en interacción con la materia . .	94
4.2.2 Actividad II: La absorción de la luz monocromática en interacción con la materia	100
4.2.3 Actividad III: Reconociendo frecuencia y energía en la interacción de la luz con la materia	106

4.2.4 Actividad IV: La transformación de la luz en la interacción de la luz y un metal.	108
4.2.5 Actividad V: La interacción de la luz con un metal en el electroscopio . .	111
4.2.6 Actividad VI: El fenómeno de polarización desde lo cuántico	114
4.2.7 Actividad VII: El experimento de la doble rendija y la introducción a la mecánica cuántica	118
4.3 Reflexiones y consideraciones sobre la construcción de la base fenomenológica	120
5 Conclusiones	123
6 Bibliografía	127
7 Anexos	131
6.1 Actividad experimental I	132
6.2 Actividad experimental II	136
6.3 Actividad experimental III.	140
6.4 Actividad experimental IV	145
6.5 Actividad experimental V	150
6.6 Actividad experimental VI.	157
6.7 Actividad experimental VII.	161

Índice de figuras

2.1	Montaje experimental de Hertz	32
2.2	Montaje experimental de Hallwachs	36
2.3	Catástrofe ultravioleta	50
2.4	Representación del experimento de la doble rendija.	56
4.1	Registro sobre la distinción del infrarrojo y la luz visible	107
4.2	Registro sobre la relación de la radiación térmica y el experimento de los globos . .	107
4.3	Montaje experimental del oscilador de Hertz	109
4.4	Registro sobre la relación entre la intensidad y la orientación del polarizador.	117

Índice de tablas

4.1	Descripción del momento I de la propuesta de aula	86
4.2	Descripción del momento II de la propuesta de aula	88
4.3	Descripción del momento III de la propuesta de aula	89
4.4	Descripción del momento IV de la propuesta de aula	91
4.5	Organización de los registros de la primera parte del momento I	94
4.6	Organización de los registros de la segunda parte del momento I	102
4.7	Organización de los registros de la primera parte del momento III	109
4.8	Organización de los registros de la segunda parte del momento III	111
4.9	Organización de los registros de la primera parte del momento IV	112
4.10	Organización de los registros de la segunda parte del momento IV	115

CAPÍTULO 1

Contexto problemático y metodología de investigación

En algunos colegios, la física se enseña de manera fragmentada y más aún se evita enseñar la mecánica cuántica a los estudiantes, se piensa que los estudiantes no cuentan con un bagaje suficiente para abordar estos saberes, además, los estándares de educación en ciencias naturales en Colombia, los cuales proponen una visión contextualizada de la ciencia, no mencionan entre sus competencias y habilidades el componente de la mecánica cuántica en los procesos físicos, a pesar que en química se abordan algunos resultados implícitos de la teoría cuántica. Al igual, se continúa enseñando la física clásica, desconociendo la construcción de conocimiento moderno desde 1900, lo cual refuerza ideas lineales, absolutas y mecanicistas de la ciencia ignorando la revolución cognitiva sobre una nueva visión de

mundo que requiere pensar en propuestas y estrategias metodológicas para introducir la mecánica cuántica.

En los cursos de educación media, muchas veces los docentes de física, se limitan a enseñar la mayoría de temáticas relacionadas con la física clásica, puesto que consideran que otros tópicos como los que se estudian en la física moderna son demasiado complejos (se privilegia la formalización matemática) para que los estudiantes los comprendan, no obstante, algunas investigaciones en enseñanza de la física han mostrado que la física clásica también es difícil, puesto que al igual que la moderna es abstracta para los alumnos, lo cual los lleva a presentar serias dificultades conceptuales para comprenderla (Ostermann & Moreira, 2000).

Intentar dar solución a las diferentes dificultades que encuentran los estudiantes alrededor de la física moderna, entre las cuales están: la noción de estado, el principio de superposición, el comportamiento dual de la luz y la materia, la interpretación del efecto fotoeléctrico, es un desafío para los docentes y por ende se debe promover propuestas que solucionen tales problemáticas. Si bien la enseñanza de la mecánica cuántica está llena de dificultades (Cortés, 2018; Fischler y Lichtfeldt, 1992; Gil y Solbes, 1993; Sign y Marschman, 2015), una de las razones es que los estudiantes no ven la física cuántica como un cambio necesario frente a los inconvenientes de la mecánica newtoniana y es allí donde el estudiante debe comprender que la física clásica funciona con los modelos de partícula y onda, deterministas, que no pueden explicar una serie de experiencias a nivel atómico (Sinarcas & Solbes, 2013). Los textos actuales que incluyen temas de la física moderna no establecen puentes entre la física clásica y la física moderna, originando analogías incorrectas y peligrosas frente a los sistemas físicos, así como en su significado y uso conceptual dentro

de la organización de explicaciones y es debido a la falta de interpretación frente a los fenómenos a nivel atómico, por ejemplo, el uso poco claro del comportamiento dual de la materia, donde se afirman que las partículas son corpúsculos y ondas clásicas, difiere de cómo se manifiesta la naturaleza realmente; al igual cuando se introduce el principio de indeterminación, se le atribuye a la falta de precisión de los instrumentos o un impedimento para medir con exactitud. A la vez, en la química se usan conceptos como el enlace químico, los modelos atómicos y la espectroscopía que descansa sobre los fundamentos de la teoría cuántica que se introducen, sin el cambio conceptual desconociendo las dificultades y preocupaciones que llevaron a esos conocimientos (Caldeira, 2017).

Luego, para que la física sea inteligible, se requiere de una adecuada recontextualización de los problemas que llevaron a formular nuevas teorías y organización de explicaciones, como también reconocer que la actividad experimental forma parte de la conceptualización y de la construcción de fenomenologías que dan cuenta de un proceso de formalización en la enseñanza de las ciencias. La recontextualización de saberes tiene en cuenta la relación que establecieron los científicos con los fenómenos, a partir del estudio de originales, los cuales vincula la intencionalidad continua con el sujeto que los estudia y de acuerdo con lo observado, se hace dinámico en su construcción. El fenómeno no se esconde ante las preguntas e inquietudes de quien lo estudia. Subyacente a esto, están las estrategias y nociones que el sujeto construye en su necesidad de organizar explicaciones y formular otras preguntas (Sandoval, Malagón, Garzón, Ayala y Tarazona, 2018).

1.1 Planteamiento del problema

La mecánica cuántica es el marco teórico con el cual ha sido posible describir, correlacionar y predecir el comportamiento de muchos sistemas físicos (cuánticos), desde

partículas (electrones y fotones), núcleos, átomos y radiación, hasta moléculas y materia condensada, pero el surgimiento de esta teoría implicó nuevas maneras de interpretar y dialogar con la naturaleza como lo menciona Dirac:

La tradición clásica consideraba el mundo como la asociación de objetos observables (partículas, fluidos, campos, etc.) que se mueven según las leyes de fuerza fijas, pudiéndose, pues formar una imagen mental de todo el esquema en el espacio y el tiempo. Ello conducía a una física cuyo método consistía en hacer hipótesis sobre el mecanismo y las fuerzas que relacionan dichos objetos observables. En los últimos tiempos se ha ido haciendo cada vez más evidente que la naturaleza actúa en un plano distinto. Sus leyes fundamentales no rigen el mundo directamente tal como este aparece en nuestra imagen mental. (Dirac, 1930, p. 9)

Estos cambios, reconocieron el papel del observador y su influencia sobre lo medible, permitiendo lograr explicaciones de esquemas particulares únicos, obligando a que el sujeto en su diálogo con la naturaleza interprete y construya lo que se observa sin contar con una experiencia previa o con elementos conceptuales conocidos.

Vivimos en un mundo, donde la luz hace parte de nuestras vidas. Podemos observar los cuerpos, la naturaleza, las personas y explicamos este fenómeno de observación en términos de la reflexión de la luz sobre los cuerpos y nuestros ojos, luego la vista es un receptor que envía señales al cerebro y allí se transforma en imágenes de lo percibido. Pero, ¿Qué es la luz? ¿Cuál es su importancia en el surgimiento de la mecánica cuántica y en la interacción con la materia? ¿Qué papel juega el concepto de fotón en la explicación del comportamiento dual de la materia? ¿Por qué es importante estudiar la mecánica cuántica en la escuela media desde la naturaleza de la luz? ¿Qué diferencia hay entre una onda clásica y una cuántica? ¿Por qué las explicaciones de los fenómenos de interferencia y difracción clásicos no son extensibles a nivel atómico? Preguntas que obligan a pensar en la necesidad de una nueva manera de dialogar con el fenómeno a estudiar (el campo electromagnético en

su interacción con la materia) a construir explicaciones desde lo cuántico exigida por los hechos experimentales, indicando que además de la inexactitud de las leyes físicas, hay una insuficiencia en los conceptos físicos que den explicaciones a los fenómenos microscópicos.

Por lo anterior, el presente trabajo de investigación pretende analizar el fenómeno de interacción luz - materia, el cual resulta relevante en la construcción de organizaciones, explicaciones, generación de preguntas y argumentos en la formalización de fenómenos físicos en la mecánica cuántica; partiendo de un estudio histórico - crítico, que aporta en la consolidación de la naturaleza de la interacción luz - materia y su relación con el surgimiento de la mecánica cuántica.

Dialogar con el pensamiento de autores como Henri Hertz, Max Planck, Albert Einstein, Louis De Broglie y Werner Heisenberg, cobra sentido en la medida que se logren identificar distintas perspectivas y formas de proceder al momento de intentar dar cuenta de fenómenos físicos de los cuales cada autor es participe y según su percepción propone una forma de organización particular que logra dar cuenta de aquello que genera inquietudes y por ende requiere de explicaciones concretas.

Al introducir los análisis histórico-críticos para la enseñanza de la mecánica cuántica, se da la posibilidad de realizar una estructuración y organización de los fenómenos a nivel atómico para su explicación, ya que al hacer una recontextualización de los saberes se busca abordar las problemáticas, en las cuales surgieron diferentes formulaciones en torno a la mecánica cuántica, a raíz de las dificultades que no lograba explicar la física clásica en ese momento histórico. La búsqueda de una reconceptualización y de las redefiniciones que nacen a partir de concebir la física no como una teoría inmutable que no puede ser revisada,

llevan al maestro a estar en una continua indagación acerca de los procesos de conocimiento de la física en el aula, acordes con el continuo desarrollo científico y arrojan elementos de discusión y análisis significativos para el proceso de formación del docente y por ende tener implicaciones directas en el aula de clase (Ayala, 1999).

1.2 Justificación

En la enseñanza de la física, uno de los temas que está ausente en los currículos de ciencias naturales es el relacionado con la física moderna, ya sea, porque los estudiantes tienen dificultades en la comprensión conceptual que fundamenta la mecánica cuántica o porque, no se hace uso de actividades experimentales que permitan construir conocimiento alrededor de fenómenos cuánticos como lo es, la interacción de la luz con la materia. Estas dificultades, requieren de ser reflexionadas e investigadas en función de mejorar los procesos de enseñanza y aprendizaje de la física, teniendo en cuenta que no solamente la física moderna presenta dificultades, sino la física en general, la cual es llevada al aula de manera lineal, absoluta y con una única estructuración de las temáticas, las cuales limitan la enseñanza de la física (Ayala, Romero y Malagón, 2004). Es decir, la física moderna, al igual que la física clásica presentan dificultades en su enseñanza, sin embargo no son del mismo orden de las de otros saberes de la física, ya que enseñar mecánica cuántica implica que el sujeto cambie su manera de dialogar con la naturaleza, porque no se cuenta con una experiencia previa y se necesita construir una organización intencionada de actividades experimentales, además, para comprender el surgimiento de la mecánica cuántica, se requiere de interpretar cómo es que la luz interactúa con la materia y a qué se debe que los conocimientos de la física clásica no sean suficientes para construir explicaciones sobre una base experimental. Por esta razón, se requiere construir un conjunto de actividades

experimentales estructuradas y organizadas de manera intencionada por el sujeto, para comprender la interacción de la luz con la materia y la necesidad de pensar en lo cuántico, que posibilite generar un campo de efectos, construir relaciones y lenguajes.

Uno de los problemas que suscita el surgimiento de la teoría cuántica es la interacción de la luz con la materia, cuyas explicaciones se originan con Henri Hertz, dando cuenta de la existencia de las ondas electromagnéticas en 1887, y a raíz de esta demostración, se plantearon nuevos experimentos desde el punto de vista clásico, donde se manifestaban propiedades eléctricas y magnéticas de la luz en su interacción con la materia.

Luego, Albert Einstein en 1905, propone explicaciones del efecto fotoeléctrico observado por Hertz, desde la base de explicaciones que había propuesto Max Planck para la radiación del cuerpo negro, el cual afirmaba que la energía era discreta, es decir que la energía estaba cuantizada.

La necesidad de dar respuesta a lo observado desde principios de la física clásica, llevó a que algunos científicos propusieran nuevas teorías que permitieran comprender la interacción de la luz con la materia. En esta comprensión, desde el aula, se identifican dificultades en los estudiantes, porque se requiere construir una nueva experiencia, ya que no se cuenta con ella y cuya consideración de pensar en lo cuántico, requiere otras formalizaciones del fenómeno de interacción luz materia, desde experimentos que vinculen el fenómeno de absorción y transformación como el efecto fotoeléctrico, el experimento de la doble rendija y la polarización de la luz. En este sentido, tiene un lugar muy importante el lograr plantear, desde los experimentos que se seleccionan, los problemas conceptuales que están involucrados.

En consonancia con el contexto problemático presentado se plantea la siguiente pregunta problema.

1.3 Pregunta problema

¿Cómo el estudio histórico-crítico sobre la interacción de la luz con la materia aporta en el diseño de actividades experimentales para la construcción de una base fenomenológica como introducción a la mecánica cuántica?

1.4 Objetivo general

Construir una base fenomenológica, a partir de un estudio histórico-crítico sobre la interacción de la luz con la materia como introducción a la mecánica cuántica.

1.5 Objetivos específicos

- Realizar un estudio histórico - crítico sobre la interacción de la luz y la materia que brinden al maestro nuevos elementos en la comprensión de fenómenos y diseño de actividades experimentales como entrada a la mecánica cuántica, desde una recontextualización de saberes.
- Diseñar e implementar actividades experimentales orientadas a organizar explicaciones como introducción a la mecánica cuántica.
- Analizar y sistematizar la experiencia de los estudiantes en la construcción de la base fenomenológica alrededor del problema de la interacción de la luz con la materia.

1.6 Metodología

La metodología es de corte cualitativo, la cual como lo afirma Hernández “El enfoque cualitativo se selecciona cuando el propósito es examinar la forma en que los individuos perciben y experimentan los fenómenos que los rodean, profundizando en sus puntos de vista interpretaciones y significados” (2016, p. 358) y el método para llevar a cabo este trabajo de investigación se plantea en dos direcciones: los análisis histórico críticos y una perspectiva fenomenológica. Según Ayala, “Los estudios histórico críticos son en sí mismos procesos de recontextualización de los saberes científicos en donde se establece un diálogo. Este tipo de análisis involucra un proceso tridimensional” (2006, p. 29).

Es decir que el análisis histórico - crítico es llevado a cabo en tres momentos: primero, el estudio del fenómeno realizado por el autor; en segundo lugar, está la importancia de las contribuciones del autor y finalmente, el valor pedagógico de la historia para la enseñanza de las ciencias.

En esta dirección, los análisis histórico - críticos en la enseñanza de la ciencia surgen como espacios de recontextualización de saberes que favorecen la construcción de explicaciones bajo una fenomenología, es decir:

La investigación histórica no sólo permite comprender mejor el estado actual de la ciencia, sino que al demostrar que ésta es en parte convencional y accidental, saca de allí nuevas posibilidades. Este punto de vista superior, al tomar diversos caminos, puede abrazar una mirada más libre del conjunto de la ciencia y reconocer rutas todavía no recorridas. (Duhem, 1995, p. 499)

Así, en primer lugar, se establece un diálogo con los autores y sus obras: Hertz H. (1887). *Über einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung* (Sobre

la influencia de la luz ultravioleta en la descarga eléctrica), Planck, M. (1901). Sobre la ley de distribución de la energía en el espectro normal, Einstein A. (1905) Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz y De Broglie (1924) Recherches sur la théorie des quanta (Investigaciones sobre la teoría cuántica). Estos textos dan cuenta del origen e importancia de fenómenos como la radiación del cuerpo negro y en particular el estudio de la interacción luz - materia en la enseñanza de la mecánica cuántica, así como de los experimentos, condiciones y explicaciones que permitieron organizar los fenómenos alrededor del surgimiento de la mecánica cuántica. Por lo tanto,

Estudiar con ellos es acudir a esa conversación desde lo que somos y hacemos. Desde lo que somos porque, aunque la estructuración de los fenómenos sea distinta, tenemos una experiencia informada producto de nuestra formación, con la cual llegamos a indagar por nuestras preguntas para enriquecer nuestra perspectiva, para producir ampliaciones, rectificaciones y desarrollar criterios de análisis que no se pueden lograr con la manera reducida en que los fenómenos son presentados en los libros especializados de hoy. (Sandoval, et al, 2018, p. 24)

A partir de los estudios histórico - críticos se abordan las dinámicas de construcción de nociones como el estado de un sistema cuántico, la superposición y el comportamiento dual de la materia, los cuales orientan y establecen relaciones en la organización de los fenómenos cuánticos.

En segundo lugar, en la perspectiva fenomenológica se establecen relaciones entre la percepción y el lenguaje en los procesos de formalización. Este aspecto pensado para el aula vincula elementos epistémicos y cognitivos en la organización del fenómeno. Bajo esta perspectiva, la actividad experimental constituye, estructura y posibilita escenarios de análisis, donde no están presentes esquemas conceptuales que estén articulados a la experiencia, ni una organización de experiencia inicial. Por lo tanto, se requiere diseñar

experiencias y construir una base fenomenológica bajo la cual se elabore un campo de efectos y relaciones (Sandoval et al, 2018).

Además, la articulación de una base fenomenológica con los procesos de enseñanza en ciencias, dinamizan y establecen espacios de relaciones que dan cuenta de los fenómenos cuánticos, en particular de la interacción de la luz con la materia, haciendo la experiencia desde este escenario organizada, ordenada y precisa, lo cual genera procesos de formalización en el aula y amplía la experiencia de los estudiantes en la enseñanza de las ciencias. El fenómeno de absorción de la luz en la materia produce efectos eléctricos, ya que la luz es una radiación electromagnética y los átomos con los que interactúa tienen en su composición protones y electrones, entonces debe producirse efectos eléctricos, y por lo tanto permite construir relaciones y nuevas maneras de hablar del fenómeno.

La construcción de la base fenomenológica se llevó a cabo como introducción a la mecánica cuántica en grado undécimo del Colegio Parroquial Confraternidad de la Doctrina Cristiana, ubicado en la localidad de Puente Aranda en la ciudad de Bogotá. Esta propuesta se basó en el desarrollo de las actividades experimentales, para las cuales se contó con tres horas de clase semanales de 40 minutos, teniendo en cuenta el contingente de la pandemia durante el año 2021 y en la cual el colegio manejó la modalidad de presencialidad bajo los protocolos de bioseguridad. Para cada sesión de 36 estudiantes, en promedio asistieron de manera presencial 22 estudiantes y el resto se conectaba virtualmente, lo cual requirió del uso de videos y complementar los espacios del diseño de los montajes y la realización de las actividades. Dos horas de clase fueron dedicadas a la construcción de los montajes y desarrollo de la actividad experimental, la otra hora de clase a los espacios de lectura,

discusión, preguntas y construcción de explicaciones, así como de propuestas de otros montajes.

El análisis de cada uno de los momentos desarrollados por los estudiantes de grado undécimo en la implementación en el aula permitió que ellos organizaran sus explicaciones haciendo seguimiento del progreso de las actividades experimentales y el lenguaje alrededor del fenómeno con el uso de la bitácora (donde los estudiantes registraron explicaciones, respuestas a preguntas, representaciones, nuevas organizaciones e interpretaciones), junto con los videos de las experiencias y las explicaciones, preguntas, espacios de discusión y reflexiones que se articulan con lecturas de apartes de los originales adaptados de cada uno de los científicos que se preocuparon por la interacción de la radiación electromagnética con la materia.

1.7 Dificultades de la enseñanza de la mecánica cuántica

Dentro de las grandes dificultades para llevar la mecánica cuántica al aula, está la importancia que recae en la relación entre la física y la matemática, donde en algunos casos se le da más importancia al formalismo matemático, ignorando el significado e interpretación con el fenómeno asociado y sugiriendo ambientes de enseñanza de las ciencias carentes y alejados de la experiencia de los estudiantes. A lo largo de los años, la matemática ha permitido que la física disponga de una herramienta, la cual es parte constitutiva en la manera de proceder para comprender los fenómenos físicos y generar nuevos saberes, ya sea de orden matemático o principalmente dentro del mismo campo de la física. (Cortés, 2018)

La mecánica cuántica es una de las ramas de la física de mayor dificultad en el proceso de enseñanza - aprendizaje y por ende llevar esos conocimientos al aula y al público en

general es uno de los grandes retos de todo licenciado en física. Pero, hay que tener en cuenta que los desarrollos científicos y en general la ciencia es una construcción humana que parte de la experiencia del ser humano al interactuar con la naturaleza, buscando lograr entender su manera de comportarse, ya sea implícitamente o explícitamente. Es así, que el edificio de la ciencia en principio no es absoluto y está continuamente avanzando, por ende, estos conocimientos deben ser llevados al aula e integrados bajo un currículo en ciencias donde se construya una base fenomenológica que permita al estudiante comprender el comportamiento de la naturaleza a nivel atómico.

Así, los saberes de la mecánica cuántica deben servir de plataforma a nuevos descubrimientos en la ciencia y por lo tanto la importancia de articular estos saberes dentro del currículo de ciencias naturales, ya que, la historia de la mecánica cuántica sigue su curso y nuevos avances cada día deben llevar al ser humano a interiorizar nuevos conocimientos en su intento de comprender el mundo.

1.8 Virtudes en la enseñanza de la interacción luz - materia como entrada a la mecánica cuántica en la escuela media

La enseñanza de la física en general es importante dentro de las habilidades y competencias que desde la educación media se pretenden desarrollar, de acuerdo con los lineamientos del Ministerio de Educación y en particular enseñar mecánica cuántica, favorece otras posibilidades, como son las siguientes:

1. Amplia la experiencia del estudiante, ya que pensar en la interacción de la luz con la materia permite la organización de nuevas explicaciones del mundo natural y otras maneras de pensar.

2. El conocimiento de la luz como una radiación electromagnética y de la materia con propiedades eléctricas, lleva a plantear cómo es que interactúan, y a partir de este problema poder comprender el comportamiento dual de la luz y la materia.
3. Favorece una mirada total de la física y no fragmentada, no lineal, no acumulativa, no secuencial de esta, ya que amplía la noción de mundo de los estudiantes, permitiendo desde una perspectiva fenomenológica, construir actividades experimentales intencionadas y organizadas, donde se establecen otras relaciones.
4. Da cuenta de nuevas miradas de conocer e interpretar la naturaleza. La física cuántica además ha facilitado nuevos enfoques debido a sus implicaciones, desde donde se elaboran discursos y discusiones como la filosofía de la incertidumbre, el papel del observador en un fenómeno, entre otras posturas que han causado controversia en la física y en otras ramas del saber. La mecánica cuántica es una de las ramas más importantes de la física en el siglo XX, debido a su revolución conceptual para explicar los fenómenos, modificando la manera en que los físicos ven la naturaleza, lo que justifica el interés de maestros e investigadores por estudiar los procesos de enseñanza y aprendizaje de la física cuántica desde mediados del siglo XX (Akarsu, 2010).
5. Las formalizaciones que se dan allí, son base de nuevo conocimiento, de nuevas preguntas, de otras explicaciones, de otras teorías.
6. El diálogo que establece fenómeno - sujeto (percepción y construcción de un discurso (lenguaje)) dentro de la mecánica cuántica implica otras formas de construir magnitudes, de medir, de formalizar, de preguntarse y generar otras preguntas en la relación entre la conciencia (no es externo) y el sujeto, donde lo importante no es la causa y el efecto, sino las relaciones que surgen de la interacción de la luz con la materia.

7. Permite reflexionar conceptualmente e históricamente, acerca de cómo se plantean cambios necesarios frente a los de la física clásica, como la causalidad, la medida, el problema de la indeterminación, la naturaleza dual de la luz para abordar la física a nivel microscópico.
8. Enseñar mecánica cuántica desde una perspectiva histórico crítica familiariza al estudiante con las formas de trabajar de los científicos, cómo se hace ciencia, en la cual se aborden sus dificultades, incertidumbres, desarrollo de nuevos planteamientos, controversias, errores, aceptación de la comunidad científica, consensos e implicaciones del surgimiento conceptual, hasta su refutación, donde aspectos como la imaginación, las motivaciones personales y el contexto del científico recalcan su importancia de enseñanza en el aula.
9. Enseñar mecánica cuántica desde una perspectiva fenomenológica, permite plantear actividades experimentales como parte estructurante de los procesos de conceptualización y construcción de conocimiento en el aula.
10. En la enseñanza de las ciencias sirve de base para reconocer que se debe investigar en las dificultades que se presentan en la enseñanza de la física, en particular la cuántica que no se enseñan precisamente por ser difícil, por lo tanto, reconocer su importancia permite a los docentes de educación media otras formas y didácticas para ser llevadas al aula.
11. Desde mi experiencia, la física cuántica se concibe difícil en general porque se piensa que para llegar a comprender esta rama del saber se requiere de una buena base matemática, donde algunas veces, nosotros como docentes, le damos más importancia a algoritmos que a generar espacios donde el estudiante construya un discurso alrededor de los fenómenos y ponemos barreras entre la naturaleza y el estudiante. Esto también me permite reflexionar y repensar en nuevos escenarios para que el estudiante dialogue con la naturaleza de manera intencionada.

12. Da valor al desarrollo científico y tecnológico y su relación de lo cuántico con la técnica y la sociedad.

CAPÍTULO 2

El fenómeno de interacción de la luz con la materia: Una recontextualización de saberes

El presente capítulo se estructura en un análisis histórico crítico de propuestas teóricas y experimentales, el cual profundiza en dos preguntas. La primera surge de la necesidad de comprender cómo la luz al incidir sobre un material produce unos efectos, en particular con luz ultravioleta, lo que lleva a organizar el fenómeno de manera diferente a las concepciones clásicas y la segunda, es cómo los fenómenos de absorción y emisión de luz al interactuar con la materia genera contradicciones al considerar la luz como una onda.

Para responder a estas preguntas y poder comprender la fenomenología se acude a científicos de finales del siglo XIX e inicios del XX: Heinrich Hertz, Max Planck, Albert Einstein y Louis De Broglie; con ellos se reflexiona sobre las disciplinas, su estructura, los

objetos de estudio, los problemas sobre los que se indagan, los procedimientos que se consolidan, los lenguajes que se construyen y con estos análisis se puede llegar a generar espacios de reflexión, indagación, llegar a la noción de diferentes conceptos en la dirección de construir una base fenomenológica, reconociendo que el fenómeno de interés ya ha sido estudiado por otros, sin afirmar que lo que pensamos actualmente es resultado de un acumulado, sino que las preocupaciones son las mismas y brindan otras maneras de abordar (Sandoval, et al, 2018).

A finales del siglo XIX, la luz tenía dos bases (según su comportamiento) de explicación para la comprensión de fenómenos como la reflexión, refracción, interferencia, difracción y dispersión. Algunos de ellos se podían explicar desde una naturaleza ondulatoria y otros desde una corpuscular. Sin embargo, desde 1803 cuando Thomas Young propuso el experimento de la doble rendija y cuyo fenómeno a estudiar fue el de la interferencia de la luz, el carácter ondulatorio adquirió mayor relevancia en las explicaciones de los científicos, dado que este fenómeno no se podía explicar si se consideraba la luz como un conjunto de corpúsculos frente a la aparición de franjas brillantes y oscuras.

Luego en 1873, James Clark Maxwell, le asignó propiedades electromagnéticas a la luz, comprobando que existía una relación entre el campo eléctrico y magnético, de la cual se deducía una constante, esta correspondía a la velocidad de la luz, por lo tanto, concluyó que la luz era una onda electromagnética, dando lugar a seguir manteniendo dentro de las explicaciones de los científicos el carácter ondulatorio sobre el corpuscular.

Así, para finales del siglo XIX, los fenómenos ondulatorios habían permitido comprender la naturaleza de la luz, es decir su interpretación parte de la interacción con la

materia, donde no se consideraban efectos más que la desviación o cambio en la dirección de los rayos de luz. Sin embargo, para la misma época se habían realizado experimentos que evidenciaban efectos cuando se hacía incidir luz sobre la materia o cuando se calentaban sustancias, las cuales emitían radiación electromagnética que al hacerse pasar por un prisma permitía observar un espectro continuo característico de la sustancia.

En consecuencia, los fenómenos asociados a la luz han permitido comprender su naturaleza, pero además evidenciar que los caracteres ondulatorios y corpusculares son inseparables para poder organizar el fenómeno de interacción de la luz con la materia. Sin embargo, dos de esos fenómenos (absorción y transformación de la luz) llevaron a comprender de manera completa el comportamiento de la luz en su interacción con la materia, es decir, que estos fenómenos relacionados con la luz daban lugar a contradicciones si se hacían desde explicaciones clásicas. Dentro de los fenómenos a analizar, en la comprensión de la interacción de la luz con la materia, están el efecto fotoeléctrico y la radiación del cuerpo negro, los cuales requieren de construir nuevas explicaciones en la dificultad de cómo se distribuye la energía asociada a la radiación electromagnética. Las contradicciones son debidas a que las explicaciones se realizan desde la naturaleza ondulatoria, pero los científicos que investigaron estos fenómenos se dan cuenta que se debe volver nuevamente a la naturaleza corpuscular, pero además le asignan explicaciones completas a la luz y permiten afirmar que la luz tiene un comportamiento dual.

2.1 La interacción de luz ultravioleta con metales

Caracterizar la luz a partir de su interacción con la materia ha estado presente en la comprensión de fenómenos alrededor de la luz y es en ese sentido que el sujeto se aproxima

a las imágenes de mundo desde unos supuestos epistemológicos que le permiten formular nociones que se decantan en la formalización de explicaciones y que dan cuenta de la naturaleza de la luz.

A finales del siglo XIX, Maxwell había construido explicaciones teóricas de las ondas electromagnéticas, pero su comprobación experimental llevó a que la luz al interactuar con la materia producía unos efectos, los cuales al hacerlos corresponder con la teoría clásica no estaban en concordancia con la parte experimental. Así, saber que la luz al interactuar con la materia se puede explicar bajo dos naturalezas diferentes (corpúscular de Newton y la ondulatoria de Maxwell) asociadas a los fenómenos, permitió ir más allá de lo observado y poder medir alguna magnitud física que diera cuenta de efectos no visibles. Las descargas eléctricas eran parte de comprobar la naturaleza electromagnética de la luz, pero al hacer incidir luz sobre una de las placas donde se producía la descarga, hacía que esta se produjera más rápido, lo cual no se podía explicar desde esta naturaleza porque se suponía que, bajo la teoría de Maxwell, la energía era una función continua que se distribuye en el espacio y si se aumentaba la intensidad de la luz incidente, la radiación electromagnética no presentaba cambios en la descarga eléctrica.

2.1.1 Las descargas eléctricas debidas a la interacción de la luz con los metales

En la dirección de profundizar en la naturaleza de la luz, en 1887 Heinrich Hertz preocupado por comprobar la existencia de las ondas electromagnéticas de baja frecuencia, cuya formulación teórica había sido presentada por James Clark Maxwell en 1873, sugería que la luz se manifestaba en una naturaleza interdependiente de propiedades eléctricas y magnéticas. Es así, que Hertz mediante una serie de experimentos sobre resonancia entre

osciladores eléctricos, logra ver la influencia de la luz ultravioleta en la producción de una chispa, cuando se descargaba un inductor, la cual induce una oscilación y para esto midió la longitud de las chispas producidas y el efecto de esta radiación electromagnética sobre el terminal negativo de una bobina inductora.

La siguiente imagen muestra el montaje experimental utilizado por Heinrich Hertz y la disposición de los aparatos, donde A representa el inductor, B el descargador y M el micrómetro con el cual la configuración abcd detectaba la recepción de la onda electromagnética y la influencia de la chispa producía en “A”, C y C’ dos conductores en línea recta, separados a una distancia de 3m.

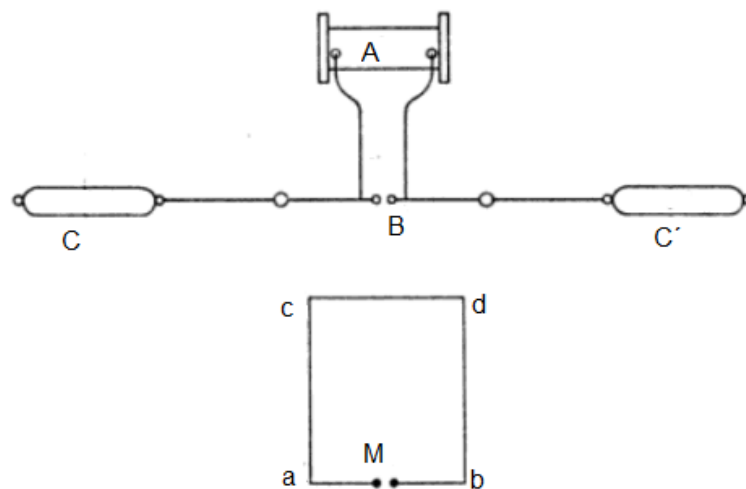


Figura 2.1 Montaje experimental de Hertz (Hertz, 1990, p. 983).

Debido a una corriente inductora se manifestaba una chispa en A y en B. La chispa A fue generada por un inductor grande de 52 cm de largo y 20 cm de diámetro, impulsado por 6 elementos Bunsen grandes y provisto de un interruptor especial de mercurio. Las chispas

cortas y rectas expresaron su influencia, al igual que las largas y dentadas. No había una diferencia esencial entre las chispas brillantes de color azul pálido y blanco brillante.

El efecto de las chispas llevó a que Hertz hiciera una serie de experimentos buscando indagar acerca de la interacción entre las chispas A y B con otros materiales introducidos entre estas. Para esto, el fenómeno observado no se podía atribuir a un efecto protector electrostático o electrodinámico, porque no solo los buenos conductores, insertados entre A y B, mostraron el efecto, sino también los no conductores perfectos, especialmente vidrio, parafina, caucho duro, que no pueden ejercer un efecto protector.

Sin embargo, Hertz al trabajar con tubos en los cuales se encontraban gases entre las dos chispas, observó que no todas las partes de la chispa “A” participan igualmente en el efecto; este sucede en la vecindad de los polos, principalmente en la vecindad del polo negativo. Para esto Hertz obtuvo la chispa B con una longitud de 1-2 cm, sombreando las bolas de manera separada. Sombrear el ánodo tenía menos influencia que sombrear el cátodo, el cual cancela la mayor parte del efecto.

Este llevó a Hertz a profundizar en la comprensión de los efectos originados por la chispa “A” en la “B”, es decir por qué se producía en línea recta, en diferentes direcciones y además comprobar fenómenos asociados a la luz como la refracción y la reflexión.

Con esto en mente, se empezó a formalizar las explicaciones alrededor de la comprensión de la chispa asociándola con la luz, pero no igual a la visible, porque los efectos eran diferentes en cada uno de los fenómenos, como lo menciona Hertz:

Hasta donde sepamos lo comunicado hasta ahora, estaremos de acuerdo en que mientras no se demuestre lo contrario, la luz de la chispa A debe ser considerada como

la siguiente causa del efecto que de ella emana. Cualquier otra presunción basada en lo que se conoce se contradice con uno u otro intento, pero el fenómeno observado es generalmente un efecto de la luz entonces, según los resultados de los fenómenos de refracción, es solo el de la luz ultravioleta. Que no es uno de los tipos de luz visibles lo prueba el hecho de que el vidrio y la mica son impermeables para quienes son permeables a ellos. Por otro lado, el hecho de que el efecto sea el de la luz ultravioleta se hace probable por los fenómenos de absorción. (Hertz, 1887, p. 997)

Hertz planteaba una nueva experiencia, en la cual evidencia los efectos de la luz ultravioleta en la producción de la chispa y cuya caracterización de materiales muestra la diferencia con la luz visible, dando lugar a caracterizar la luz desde su interacción con la materia, además de considerar que se puede presentar un fenómeno que no se había estudiado antes en la interacción con la materia y es la absorción por parte de la materia en su interacción con la luz, donde Hertz evidenció que los efectos no son los mismos, cuando se estudia la refracción con luz visible a los observados con la chispa. Al igual que cuando se hace incidir luz ultravioleta sobre el ánodo, la chispa es más corta.

Según los resultados de los experimentos de Hertz, la luz ultravioleta tiene la capacidad de ampliar el rango de las descargas de un inductor y las descargas relacionadas.

Sin embargo,

Las condiciones bajo las cuales expresa su efecto en tales descargas son, por supuesto, muy complejas y, por lo tanto, es deseable estudiar el efecto en condiciones más simples, especialmente evitando el inductor. Al tratar de sacar ventaja a este respecto, me he encontrado con dificultades. Por tanto, me limito por el momento a comunicar los hechos establecidos sin intentar una teoría sobre la forma en que se producen los fenómenos observados. (Hertz, 1887, p. 1000)

Hertz no estudió el efecto de la luz ultravioleta que se hacía incidir sobre el ánodo, simplemente registró lo observado y dejó evidencia de un nuevo campo de investigación para ser estudiado y era el de saber por qué la luz ultravioleta causaba efectos sobre la producción de la chispa y cómo esa interacción con los metales daba cuenta de ampliar la naturaleza de

la luz, desde el fenómeno de absorción, el cual era producto de la interacción de la radiación electromagnética con la materia y no ocurría con todos los materiales. Esto también traería dificultades en la comprensión del fenómeno porque con los conocimientos actuales no se lograba explicar el fenómeno del por qué la intensidad de luz irradiada no afectaba la longitud de la chispa.

2.1.2 El electroscopio y la luz ultravioleta

Los estudios de Hertz, cuya orientación inicial era demostrar la existencia de las ondas electromagnéticas, permitieron describir experimentos alrededor de la dependencia de la longitud máxima de la chispa producida por inducción de la irradiación de una segunda chispa cuando sobre el ánodo se hacía incidir luz ultravioleta. La facilidad para que la chispa saltara de manera más eficiente entre las dos superficies esféricas era debido a la luz ultravioleta producida por la otra chispa, dando cuenta de una interacción.

La producción de una chispa eléctrica era primero debido a la ionización del espacio entre las dos esferas, pero la longitud que podía alcanzar se maximizaba con la incidencia de luz ultravioleta, esto se sustentaba en que su efecto se justificaba primero en la absorción de la luz por parte del metal y segundo en la interacción de la emisión de luz producida por la chispa y la recepción para producir otra chispa.

La interacción de la luz con receptores metálicos se explica si se le asignan a la luz propiedades eléctricas y que al incidir sobre un elemento químico como lo es un metal produce una acción, la cual para el mismo Hertz no se podía explicar desde la física clásica, sin embargo, sirvió de base para seguir profundizando en el fenómeno por parte de W.

Hallwachs, alumno de Hertz, quien propone experimentos relacionados con la interacción de la luz con metales y la acción eléctrica sobre cuerpos cargados.

El montaje utilizado por Hallwachs para organizar el fenómeno de influencia de luz ultravioleta sobre cuerpos cargados electrostáticamente se muestra a continuación:

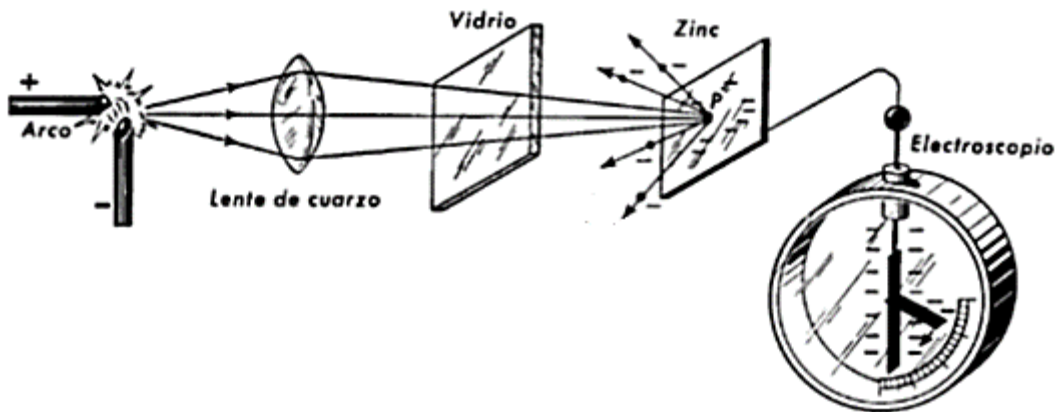


Figura 2.2 Montaje experimental de Hallwachs. Tomado y adaptado de:

http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/Ef_Fotoelectrico/AntecedentesEF.htm

Una placa de zinc- plata (Zn - Ag) y brillante de unos 8 cm de diámetro colgaba de un soporte aislante y se conectaba mediante un cable a un electroscopio de hoja de oro. En medio había un lente de cuarzo y un vidrio a través de la cual los rayos de una lámpara de arco Siemens colocada en el otro lado podían caer sobre la placa, eliminando efectos de reflexión y refracción de la luz procedente del arco voltaico. Si se carga la placa negativamente junto con el electroscopio, los rayos de luz que inciden en la placa, hace que las hojas de oro comienzan a deflactarse. En el caso de una carga positiva, a primera vista no hay efecto considerable, es decir que la luz ultravioleta al incidir sobre la placa de zinc

cargadas negativamente descarga el metal estableciendo un efecto de absorción de la luz ultravioleta.

Sin embargo, el efecto de la deflexión de las láminas de oro, era debido a que estaba ocurriendo una interacción de luz ultravioleta procedente de una chispa con una placa de metal cargada y esto permitía decir que debía haber una relación de propiedades similares en la interacción (eléctricas). Ahora, el efecto solo fue posible con la lámina de zinc cargada negativamente, cuando se cargaba positivamente no ocurrían efectos. Al igual, también Hallwachs experimento con otros metales colocando entre la chispa y la placa de zinc medios líquidos, sólidos y gases, obteniendo efectos menores al obtenido con el metal.

Para la fecha de las investigaciones de Hallwachs, todavía no se había comprobado la existencia de los electrones, lo cual dificultaba un poco las explicaciones de la descarga eléctrica en el metal (influencia de luz ultravioleta sobre cuerpos cargados negativamente), sin embargo, considerando la existencia de los electrones, lleva a tener en cuenta que la lámina tenía exceso de electrones y la luz era capaz, primero de interactuar con los electrones del metal y segundo de extraerlos. Si el electroscopio tiene cargas positivas puede que la luz extraiga algunos electrones, pero no logra arrancarlos y alejarlos. Vuelven a las láminas del electroscopio y por lo tanto su carga no varía.

La explicación según la teoría de la mecánica clásica es que la energía de una onda está repartida sobre el frente de onda y es proporcional al cuadrado de la amplitud y a la frecuencia. Además, el cristal interpuesto no evita que llegue una gran cantidad de energía, ya que sólo retiene alguna (el cristal no se calienta hasta fundirse, como sucedería si absorbiera toda). A más tiempo de exposición a la radiación más energía incidente sobre la

placa y al final se produciría la extracción repentina de todos los electrones, pero esto no sucede. Hallwachs también investigó si el efecto de los rayos de luz debía consistir en un cambio en los cuerpos cargados o en un cambio en el medio que los rodea, o en ambos a la vez, pero era poco probable que una influencia en el medio fuera la única causa, porque el efecto se produce de diferentes formas con diferentes signos de la carga y se suponía que la electricidad negativa, que abandona la placa al exponerse, pasa al cuerpo circundante y que la velocidad de esta transición depende de las fuerzas eléctricas que actúan en las proximidades de la placa.

La mecánica clásica no encuentra explicación y lo que se puede afirmar es que la extracción no depende solo de la intensidad de la luz incidente. Si el campo eléctrico de la onda electromagnética fuera responsable de la extracción, tendríamos que pensar que al incrementar la intensidad de la radiación, la energía cinética de los electrones extraídos también se incrementaría, pero esto tampoco sucede y, por lo tanto, el efecto de interacción de luz ultravioleta sobre una placa de metal continuaba sin explicación, ya que Hertz había logrado demostrar características ondulatorias y electromagnéticas de la luz, pero sin tener en cuenta propiedades corpusculares y Hallwachs propone nuevos montajes experimentales en el estudio de la influencia luz ultravioleta, cuando esta incidía sobre una placa de Zn – Ag.

2.2 El papel de la energía en la interacción de la luz con la materia y su relación con la radiación natural

Así como el fenómeno de absorción y transformación de la luz en los experimentos asociados al efecto fotoeléctrico presentaba dificultades, también ocurría lo mismo con la radiación del cuerpo negro donde la emisión de luz obligaba a considerar relaciones y

nociones nuevas frente a la energía, que al igual que en el efecto fotoeléctrico no se puede explicar desde la teoría ondulatoria de la luz porque llevaba a contradicciones.

El concepto de cuerpo negro fue propuesto por Isaac Newton en 1704 en la cuestión 6 de su libro de óptica, donde mencionaba:

¿Acaso la luz no engendra el calor en los cuerpos negros con mayor facilidad que en los otros colores, debido a que al incidir sobre ellos no refleja hacia afuera, sino que, penetrando en ellos, se refracta y refleja muchas veces en su interior hasta que absorbe y pierde? (p. 122)

Es importante resaltar en esta afirmación de Newton, primero que la interacción de la luz con la materia es analizada desde fenómenos como la reflexión y la refracción, la absorción indicada allí se muestra que ingresa la luz y se pierde, sin embargo, el concepto de cuerpo negro fue usado por Kirchhoff en 1860 en el sentido técnico, al ser asignado a un cuerpo ficticio el cual es capaz de absorber toda la cantidad de luz que incide sobre él. Kirchhoff mostró que existía una relación entre el cociente de la capacidad que tiene un cuerpo de emisión (e), sobre la capacidad de absorción (a) con la longitud de onda de la radiación (emitida o absorbida) y la temperatura (Sánchez, 2005).

Además, Kirchhoff, planteó que cuando un cuerpo caliente emite rayos de calor, estos se pueden clasificar en rayos oscuros (no visibles), rayos luminosos (visibles) y los polarizados, los cuales cumplían con la relación de dependencia del cociente e/a independiente de la longitud de onda. Teniendo esto en cuenta, aquellos cuerpos cuyo cociente era igual a 1, los denominó cuerpo negro.

Las consideraciones de Kirchhoff¹, las planteó en el sentido de poder comprender los espectros de emisión y de absorción cuando a una sustancia se elevaba su temperatura, mostrando que cuando un cuerpo era negro, es porque su espectro es continuo y no presenta ni líneas brillantes ni oscuras, concluyendo que la distribución de radiación en equilibrio no dependía de con quien interactuara el sistema, sin embargo, no se sabía cómo se llegaba a ese equilibrio y además ¿cuál era la energía de la radiación, era continua según la teoría de Maxwell o requería considerar la luz de manera diferente al carácter ondulatorio para su explicación de acuerdo con lo experimentos?

En 1895, Max Planck empezó a abordar el problema del cuerpo negro, considerando la interacción de ondas electromagnéticas con osciladores cargados de dimensiones pequeñas en comparación las longitudes de onda de la radiación. Para ello supuso que se podía plantear una relación desde la teoría electromagnética de Maxwell y la termodinámica, esencialmente para llegar al estado de equilibrio, sin embargo, el aumento o disminución de la entropía no se podía relacionar con las leyes electrodinámicas. Ahora el fenómeno de absorción también se relaciona con los fenómenos ondulatorios, electromagnéticos y constituyen nuevos campos o dominios fenomenológicos.

2.2.1 Ley de distribución de Planck, el problema del equilibrio entre radiación y materia

La energía que caracteriza un campo de radiación estacionario que se encuentra en una cavidad de cuerpo negro² direcciona el problema de cómo medir la energía si se supone

¹ *La distribución de radiación en equilibrio es independiente del sistema en el que interactúa la radiación.*

² *“Una cavidad delimitada por paredes totalmente reflectantes en la que se ha hecho el vacío y que contiene cuerpos emisores y absorbentes cualesquiera con el paso del tiempo se origina un estado en el que todos los cuerpos poseen una misma temperatura y ninguna de las propiedades de*

desde la teoría de Maxwell continua. Para encontrar una ley que explicara y organizara el fenómeno de radiación del cuerpo negro en torno a la distribución de energía, Planck supuso que la energía se distribuía en el espectro normal (aquella en la que las densidades de radiación para todas las frecuencias tienen la misma temperatura o cuyo estado de radiación es estacionario) en términos de la entropía como función de la energía vibracional monocromática de un resonador (oscilador) vibrante, los cuales hacían parte de la cavidad y no en función de la temperatura como lo habían propuesto sus antecesores, partiendo de la formulación estadística y probabilística de Boltzman de la entropía. La comprensión de la energía en relación con el fenómeno de interacción de la radiación con la materia implica un cambio, ya que la distribución de energía en un campo de radiación no es continua.

Para un resonador ubicado en un campo de radiación estacionario, la entropía S como función de la energía vibracional U , depende de cómo cambia la amplitud y la fase para intervalos de tiempo mayores al periodo de vibración, cuando estas variables se hacen constantes no hay entropía y la energía es empleada para hacer trabajo. En este sentido, el promedio de N resonadores idénticos (con frecuencia ν y energía total U_N) sin influencia el uno con respecto a otro ubicados en el campo de radiación corresponderá a la energía vibracional U de un único resonador estacionario, es decir

$$U_N = U \cdot N \quad (1)$$

radiación – ni siquiera la distribución espectral de energía – depende de la constitución de aquellos, sino exclusivamente de la temperatura . . . en concreto la cavidad estaba llena de osciladores o resonadores lineales simples débilmente amortiguados con diferentes periodos propios, y supuse que el intercambio de energía entre los osciladores debido a la radiación emitida de unos a otros conduciría con el tiempo al estado estacionario de distribución normal de la energía predicho por Kirchhoff. ” (Planck, 1948, p. 38)

Además, como la entropía es una magnitud aditiva entonces

$$S_N = S \cdot N \quad (2)$$

Planck utiliza la definición de entropía probabilística³ de Boltzman para iniciar la construcción de la ley de radiación, la cual implicaba lograr un equilibrio estadístico entre materia y radiación, ya que, desde la teoría clásica, si se utilizaba el concepto de entropía de Clausius, la energía en algún momento se transfería totalmente de la materia a la radiación y no se obtenía el equilibrio, a lo que se necesitaba que la energía se agrupara en función de la frecuencia en unidades y se pudiera solucionar el problema también de las frecuencias altas⁴ (longitudes de onda cortas). Así, desde Boltzman la entropía se define

$$S_N = k \ln W \quad (3)$$

La cual depende de cómo la energía está distribuida en el campo de radiación. Esta suposición implicaba que para calcular W, se debía interpretar U_N , como una suma de elementos iguales de energías finitas, es decir que cada oscilador comparte una misma cantidad de energía (ε) y de manera discreta por cada elemento de energía (P)

$$U_N = P \cdot \varepsilon \quad (4)$$

Sin embargo, el valor de ε no es conocido, se sabe que representa un elemento de energía, pero no su significado físico dentro del cálculo de la entropía. El valor de W que

³ La transición de un estado del sistema se hace de un estado a otro más probable y está asociada al crecimiento de la entropía.

⁴ La distribución de Wien no correspondía con la evidencia experimental y fallaba en ese lugar del espectro.

representa la probabilidad de posibles maneras de distribuir la energía en cada uno de los N osciladores, permite hacer uso de estas combinaciones

$$W = \frac{(N + P - 1)!}{P!(N - 1)!} \quad (5)$$

Cuyo valor es un número definido, entero y finito. Utilizando el teorema de aproximación de Stirling⁵, se puede reescribir (5) como

$$W = \frac{(N + P)^{N+P}}{P^P N^N} \quad (6)$$

Por lo tanto, la entropía (3) del sistema de resonadores, se puede reescribir como

$$S_N = k \{(N + P) \ln(N + P) - N \ln N - P \ln P\} \quad (7)$$

y utilizando (1), (2), (4), la entropía (S de un resonador en función de la energía vibracional es:

$$S = k \left\{ \left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) \ln \left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) - \frac{U}{\varepsilon} \ln \left(\frac{U}{\varepsilon}\right) \right\} \quad (8)$$

Es decir que se ha obtenido la entropía en función de la energía vibracional.

Ahora, Wien y M. Thiesen plantean que la densidad de volumen de radiación está dada por

$$E \cdot d\lambda = T^5 \psi(\lambda T) \cdot d\lambda \quad (9)$$

⁵ $N! = N^N$

Donde T representa la temperatura, λ la longitud de onda de la radiación dentro de una región espacial entre λ y $\lambda + d\lambda$, ψ una función que depende de la energía media de cada oscilador y su frecuencia. Cómo se quiere buscar una relación entre la energía y la frecuencia por lo tanto, se debe encontrar una relación en términos de la frecuencia en una región espectral entre ν y $\nu + d\nu$ en vez de la longitud de onda, entonces

$$u(\nu, T) = T^5 \frac{c}{\nu^2} \psi\left(\frac{cT}{\nu}\right) \quad (10)$$

Como la energía emitida es inversamente proporcional a c^2 , entonces la densidad de energía es inversamente proporcional a c^3 , por lo tanto

$$u(\nu, T) = \frac{\nu^3}{c^3} f\left(\frac{T}{\nu}\right) \quad (11)$$

Esto nos indica que la energía de radiación es la misma para una temperatura, dada una frecuencia. Para conocer la energía U de un resonador se utiliza la relación de Planck entre la densidad de energía u y la energía de un resonador estacionario

$$U = \frac{c^3 u}{8\pi\nu^2} \quad (12)$$

de donde se deduce

$$T = \nu \cdot f\left(\frac{U}{\nu}\right) \quad (13)$$

Recordemos que la relación de cuerpo negro

$$\frac{dS}{dU} = \frac{1}{T} \quad (14)$$

Por lo tanto,

$$\frac{dS}{dU} = \frac{1}{v} f\left(\frac{U}{v}\right) \quad (15)$$

Y finalmente, la ley de desplazamiento de desplazamiento de Wien queda expresada como

$$S = f\left(\frac{U}{v}\right) \quad (16)$$

Comparando con (8) $\varepsilon \propto v$, Planck concluye que la energía

$$\varepsilon = h \cdot v \quad (17)$$

Es decir que un elemento de energía se puede expresar en función de la frecuencia de radiación emitida por una constante h^6 , denominada constante de Planck. Con esta ecuación se establece que la energía emitida por una radiación en un medio estacionario no se comporta de manera continua, como lo afirmaba la teoría clásica, sino que en concordancia con el experimento es discreta. Sin embargo, el artilugio utilizado por Planck al introducir la

⁶ Planck dedujo el valor de h como una cantidad bastante pequeña, pero no le pudo asignar un significado físico (¿Qué realidad le asigno o sobre que verdad se sustenta?) a esta constante e intentó después de publicado el artículo de 1905, encontrar un significado físico a $h \cdot v$, pero no logró, más allá de permitirle a Einstein aplicarlo en otros fenómenos físicos. Una de las dificultades frente a estaba en el carácter absolutista que siempre quiso plantear en sus investigaciones y su postura realista y "Para él, la estructura de la física reposaba en dos teoremas de contenido claramente antipositivista y realista: 1) Hay un mundo exterior real que existe independientemente de nuestro acto de conocer. 2) El mundo real exterior no es conocible directamente" (Sánchez, 2005, p.43)

probabilidad con la ecuación de Boltzman y que dos configuraciones fueran igualmente probables carecían de significado físico.

2.3 El problema de la emisión de electrones y la intensidad de luz

La deducción teórica de Planck donde proponía que la distribución de energía $E = h \cdot \nu$ en estado estacionario de la radiación era discontinua y que dependía de una constante h , fue un artilugio del cual carecía significado físico la constante h , es decir del cuanto de energía, pero que lograba explicar lo observado en el experimento de la radiación del cuerpo negro. Sin embargo, la consideración energética junto con los trabajos de Hertz, Hallwachs, Thomson y Lenard, le servirían a A. Einstein para explicar de manera satisfactoria el efecto fotoeléctrico y comprender que la energía contenida en la radiación emitida dependía de la frecuencia y de la constante h , denominada constante de Planck, pero además que su desplazamiento lo hacía en paquetes de manera discreta y que esto le permitía afirmar que cada paquete de luz era absorbido por un electrón del metal sobre el cual incidía la radiación electromagnética.

En 1905 Albert Einstein publica un artículo en la revista Anales de física de Alemania, cuyo título es *Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz*, el cual sugiere que se presenta una nueva y novedosa explicación, primero en torno a la producción de la luz, que recordando a Hertz estaba presente en la chispa, y segundo, también al interrogante de Planck para explicar la energía asociada a la radiación en el cuerpo negro, cuyos fenómenos nos hablan de la interacción de esta radiación electromagnética con la materia, es decir, para comprender y caracterizar la naturaleza de la luz, debemos indagar acerca de cómo esta interactúa con la materia, cómo se incorpora el

esquema corpuscular a los fenómenos de interferencia y difracción para acudir a nuevas formalizaciones en la presentación de nociones que permiten organizar el fenómeno.

Einstein inicia su artículo mostrando primero una clara distinción entre dos teorías: la teoría cinética de los gases (atomista – discreta) y la teoría de Maxwell (ondas electromagnéticas – continuo) donde, además sugiere implícitamente, que para describir el estado de un cuerpo se requieren solamente las posiciones y sus velocidades de acuerdo con los grados de libertad y plantea, que si se extiende al espacio electromagnético, la luz tendría naturaleza corpuscular, sin embargo, no sería suficiente para determinar su estado, ya que la energía es una función continua y no se podría considerar como una suma ponderable de sus constituyentes, según la teoría de Maxwell.

La teoría de Maxwell había sugerido que la luz es una onda electromagnética, lo cual hace encajar sus explicaciones alrededor de los fenómenos en la teoría ondulatoria, defendía por Huygens en el siglo XVIII y reforzada con las explicaciones de Maxwell. Los fenómenos en los cuales funciona perfectamente esta teoría son los de reflexión, refracción, difracción, dispersión, entre otros en torno a la luz. Sin embargo, cuando se quieren explicar los fenómenos de emisión (producción de la luz) y absorción (transformación de la luz) aparecen dificultades en torno a la continuidad y, además los conocimientos de la física clásica no logran explicar lo que sucede experimentalmente.

Teniendo presente las explicaciones de Planck en la comprensión y formulación matemática de la energía, la cual no se distribuye en el espacio de manera continua sino discreta, brinda argumentos fuertes para pensar en la naturaleza corpuscular de la luz, bajo la caracterización de Planck, planteando la siguiente hipótesis:

Las observaciones de la radiación del cuerpo negro, fotoluminiscencia, producción de rayos catódicos por luz ultravioleta y otros fenómenos asociados con la emisión y transformación de la luz parecen entenderse más fácilmente, si se supone que la energía de la luz está distribuida por el espacio de forma discontinua. (Einstein, 1905, p. 132)

Este planteamiento suponía, primero tener que volver a considerar la naturaleza corpuscular de la luz en una época, donde la teoría ondulatoria era la que explicaba la mayoría de fenómenos ondulatorias, pero, además implicaba considerar una nueva caracterización de la luz, es decir, la luz ultravioleta al interactuar con la materia se comportaba de manera diferente al resto del espectro electromagnético y la frecuencia aparece dentro de las explicaciones como magnitud. También, la energía asociada a la luz no es continua, sino discreta y estas dos nociones permiten organizar el fenómeno en la línea de los cuantos de energía, a lo que Einstein le da el nombre de cuantos de luz como unidad indivisible (solo pueden ser absorbidos o emitidos en partes enteras).

Al igual que Planck, Albert Einstein se interesó por el problema del cuerpo negro y lo planteo de la siguiente manera. Supongamos que se tiene una cavidad de paredes reflectantes, donde se encuentran un gran número de moléculas gaseosas y electrones ligados que se mueven libremente y los cuales ejercen fuerzas conservativas, es decir las colisiones entre ellos son inelásticas. Estos electrones ligados, los cuales entran en interacción conservativa los llamó resonadores y son los responsables de la interacción de la materia con la luz, donde emiten y absorben radiación electromagnética en periodos definidos. Sin embargo, Einstein se interesó por las colisiones entre los electrones ligados y cómo se llegaba al equilibrio dinámico (radiación del cuerpo negro) usando la teoría de Maxwell y la teoría cinética de los gases.

Esta última teoría permite afirmar que la energía cinética media de un resonador es exactamente igual a la energía translacional media de una molécula de gas y teniendo en cuenta los grados de libertad (principio de equipartición) y la igualdad de los promedios de la energía cinética y potencial de los resonadores entonces la energía media de cada movimiento oscilatorio lineal es dos tercios de la energía cinética y, por lo tanto,

$$N \left(\frac{1}{2} m_0 \bar{v}^2 \right) = \frac{3}{2} nRT = \frac{3}{2} k_B T \quad (18)$$

$$\bar{E} = k_B T \quad (19)$$

Ahora, la interacción de un resonador con la radiación electromagnética presente en la cavidad, Planck la expresó por medio de la ecuación (12) e igualando con (19) para tener la condición de equilibrio dinámico (de la cual Einstein no estaba de acuerdo, porque suponía un intercambio de energía ocasionado por determinados resonadores y la radiación electromagnética) se obtiene

$$\bar{E} = k_B T = \frac{c^3 \rho_\nu}{8\pi\nu^2} \quad (20)$$

Luego la energía asociada a la radiación electromagnética para alguna frecuencia, la cual no aumenta ni disminuye de manera continua, se puede escribir como

$$P_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} k_B T \quad (21)$$

Sin embargo, esta partición de la energía presente en la interacción de la luz y la materia no es correcta como lo afirma Einstein, ya que, si se considera un intervalo de frecuencia mayor, la energía total en un volumen es indefinida

$$\int_0^{\infty} \rho_{\nu} d\nu = \frac{8\pi}{c^3} k_B T \int_0^{\infty} \nu^2 d\nu = \infty \quad (22)$$

Lo cual no es coherente con la parte experimental y es lo que se denomina la catástrofe ultravioleta, la cual afirma que para longitudes bajas la distribución de Rayleigh – Jeans no está de acuerdo con los resultados experimentales, ya que implica que la energía fuera infinita y la única posibilidad para que sucediera esto es que la temperatura fuera cero y esto no está de acuerdo con la radiación del cuerpo negro, el cual emite radiación con temperaturas mucho mayores a cero. Esto muestra que partiendo de la teoría de Maxwell (clásica) no se llega a la distribución de energía que mostraba el experimento para la radiación del cuerpo negro.

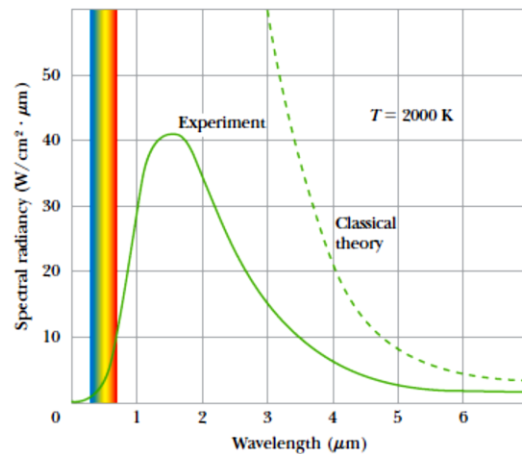


Figura 2.3 Catástrofe ultravioleta. Tomado de Tomado de: Halliday and Resnick (2014. p. 1165).

La ley de radiación propuesta por Planck

$$\rho_\nu = \frac{\alpha \nu^3}{e^{\beta \nu/T} - 1} \quad (23)$$

Donde

$$\alpha = \frac{8\pi h}{c^3} \quad (24)$$

$$\beta = \frac{h}{k} \quad (25)$$

era coherente con los experimentos, ya que predecía la curva de distribución para frecuencias altas $\beta \nu/T \gg 1$ (Ley de Wien para longitudes de onda bajas) y para frecuencias bajas $\beta \nu/T \ll 1$ (Ley de Rayleigh – Jeans para longitudes de onda altas).

Einstein continua su artículo preocupado por lo que sucedía para bajas longitudes de onda y baja densidad de energía y parte de la ley de Wien con el fin de encontrar la entropía de la radiación monocromática

$$\rho = \alpha \nu^3 e^{-\beta \nu/T} \quad (26)$$

La cual solamente es válida para frecuencias altas, sin embargo, se condicionará para encontrar unos resultados, de donde

$$\frac{1}{T} = -\frac{1}{\beta \nu} \ln \frac{\rho}{\alpha \nu^3} \quad (27)$$

y utilizando (15)

$$\varphi(\rho, \nu) = -\frac{\rho}{\beta\nu} \ln \left\{ \frac{\rho}{\alpha\nu^3} - 1 \right\} \quad (28)$$

Si se tiene radiación de energía E y frecuencia ν y $\nu + d\nu$ en un volumen V , la entropía es

$$S = V \cdot \varphi(\rho, \nu) d\nu = -\frac{E}{\beta\nu} \ln \left\{ \frac{E}{\alpha V \nu^3 dV} - 1 \right\} \quad (29)$$

Y considerando cambios solamente con respecto al volumen

$$S - S_0 = \frac{E}{\beta\nu} \ln \left\{ \frac{V}{V_0} \right\} \quad (30)$$

Lo cual muestra la dependencia de la entropía solamente con respecto al volumen.

Reescribiendo (30)

$$S - S_0 = \frac{R}{N} \ln \left\{ \left(\frac{V}{V_0} \right)^{NE/R\beta\nu} \right\} \quad (31)$$

Y comparando con (3)

$$W = \left(\frac{V}{V_0} \right)^{NE/R\beta\nu} \quad (35)$$

Lo cual implica que la energía se comporta de manera discontinua como cuantos de energía mutuamente independientes del valor $R\beta\nu/N = h \cdot \nu$. Ahora esta deducción es igual a la que llegó Planck, pero por un camino distinto, sin embargo, Einstein va mucho más allá de su deducción y plantea la hipótesis de si es posible llevarla a fenómenos de emisión y transformación de la luz (regla de Stokes, efecto fotoeléctrico y la ionización de gases por

medio de luz ultravioleta), es decir le asigna significado físico, dentro de unos experimentos que desde la física clásica no se lograban explicar, pero además, da lugar a considerar que la posibilidad de que la luz en su propia constitución para algunos fenómenos consiste de cuantos de energía (fotones⁷).

En primer lugar, la regla de Stokes plantea que la frecuencia de luz incidente que es absorbida por una sustancia fluorescente es diferente a la emitida, es decir se transforma la luz en su interacción, entonces la energía del cuanto de luz emitido no puede ser mayor de acuerdo con el principio de conservación de la energía. Este hecho, sin embargo, considerando la radiación del cuerpo negro, cuando la luz incidente no tiene la misma distribución de energía de la radiación del cuerpo negro donde la regla de Wien ya no es válida, no presenta dificultad, ya que, a densidades muy bajas, la energía sigue siendo proporcional a la frecuencia con la cual la luz incide (cuantos de luz interactúan).

En segundo lugar, otro de los fenómenos que presenta dificultades es el efecto fotoeléctrico, el cual no se podía explicar con los trabajos de Maxwell, como ya se ha descrito en este capítulo considerando la luz en su interacción con energía distribuida de manera continua sobre el espacio, ya que se debía esperar que la emisión de electrones del material tendría que estar relacionado con la intensidad de la onda, a su energía (Teoría de Maxwell). Si la intensidad de la luz incidente era baja, era de esperarse que se requería de un tiempo, mientras se acumulaba una cantidad de energía para que se produjeran los fotoelectrones y que el número de fotoelectrones de manera directa, debería estar relacionado con la intensidad (a mayor intensidad, mayor cantidad de rayos catódicos emitidos). Para explicar

⁷ Esta asignación no se dio en la época de Einstein, sino fue en 1926 cuando Gilbert Lewis le acuñó el nombre de fotón a los cuantos de luz.

el efecto fotoeléctrico se considera que cuando se hace incidir radiación electromagnética sobre la capa externa de un material, la cual consiste de cuantos de luz, ocurre una interacción (absorción), donde la energía asociada a los cuantos, se transfiere toda a un electrón de los átomos del material o parcialmente, los cuales requieren de un consumo de trabajo (P) característico del átomo, para ser removidos del material. La energía se transforma en energía cinética de los rayos catódicos (fotoelectrones) emitidos debido a que la energía asociada a la radiación electromagnética es absorbida por un electrón del metal, la cual es la necesaria para que sean liberados los fotoelectrones, además, la energía cinética de estos, no depende de la intensidad de la luz incidente, como lo había demostrado Lenard. En términos analíticos, Einstein llegó a la siguiente expresión

$$K_{m\acute{a}x} = \frac{R}{N} \beta v - P \quad (36)$$

Donde $K_{m\acute{a}x}$ es la energía cinética máxima con la cual los electrones son expulsados del material, indicando que los fotoelectrones salen del material con una velocidad máxima perpendicular la cual no depende de la intensidad de la luz incidente, como lo afirma Einstein (1905)

Si cada cuanto de energía de la luz incidente transmite su energía a los electrones, independientemente de todos los demás cuantos, entonces la distribución de velocidad de los electrones, esto es, la naturaleza de los rayos catódicos producidos, será independiente de la intensidad de la luz incidente. . . además el número de electrones que dejan el cuerpo será proporcional a la intensidad de la luz incidente. (p. 147)

Es decir, que la intensidad de la luz incidente solo afecta el número de fotoelectrones expulsados del material, siendo coherente con la naturaleza corpuscular de la luz y no la velocidad como cualidad de la radiación catódica resultante, ya que la energía transferida no

aumenta la energía cinética de los electrones emitidos y en esta última pueden interactuar muchos cuantos de luz esto es, se establece un límite que no depende de la intensidad, pero sí de la longitud de onda como se evidencia en (23).

Además, la interacción de los cuantos de luz en su misma constitución se da entre partículas de acuerdo con la teoría corpuscular y eso explica que al incidir sobre átomos de un metal, la interacción se dé con los electrones de valencia. Estos últimos absorben la energía de los cuantos y los que se encuentran lejos de la superficie pierden energía cinética hasta llegar allí permitiendo la interacción con los cuantos de luz. Luego, de paso se concluye que la emisión de fotoelectrones está correlacionada con la frecuencia y no con la intensidad de luz y el efecto fotoeléctrico, solo se evidenciaba cuando se superaba una frecuencia umbral, la cual permitía que los electrones fueran expulsados del material. A mayor frecuencia, mayor energía transportada por los cuantos de luz y mayor cantidad de fotoelectrones emitidos.

2.4 La comprensión de la naturaleza dual de la materia como base en la formalización de la interacción de la luz con la materia

La teoría corpuscular de Newton y la teoría ondulatoria de Huygens complementada por Maxwell han abierto y permitido una comprensión más amplia acerca de la interacción de la luz con la materia en diferentes fenómenos como la reflexión, la refracción, la difracción, la dispersión, entre otros, que la caracterizan y desde la cual se generó una comprensión en la relación con el mundo y en maneras de organizar el fenómeno, llevando a otras formalizaciones como lo es el cuanto de luz (fotón) de Einstein, en la cual le había otorgado propiedades corpusculares a una onda, sin embargo quedaba el interrogante de saber

sí a un corpúsculo se le podían asociar propiedades ondulatorias y qué significaba que la luz tuviera un carácter dual.

El experimento propuesto por Young en 1803 (ver figura 2.4), vuelve a aparecer y no para desmentir que la teoría ondulatoria de Huygens daba cuenta de lo observado experimentalmente y desde la cual se lograba explicar teóricamente, pero explicar dicho fenómeno en términos de las ideas de Einstein como corpúsculos se hacía imposible, ya que, si se tenía en cuenta, un rayo de luz monocromático que atraviesa una doble rendija, no lo puede hacer en partes fraccionadas para que aparezca el patrón de interferencia y además solo aparecerían dos franjas brillantes de acuerdo con la rendija, pero esto no sucede experimentalmente. Por lo tanto, si se quería unificar la naturaleza corpuscular y la ondulatoria en una completa comprensión de la luz, había que acudir a ampliar la teoría y formalizar la interacción de la luz con la materia.

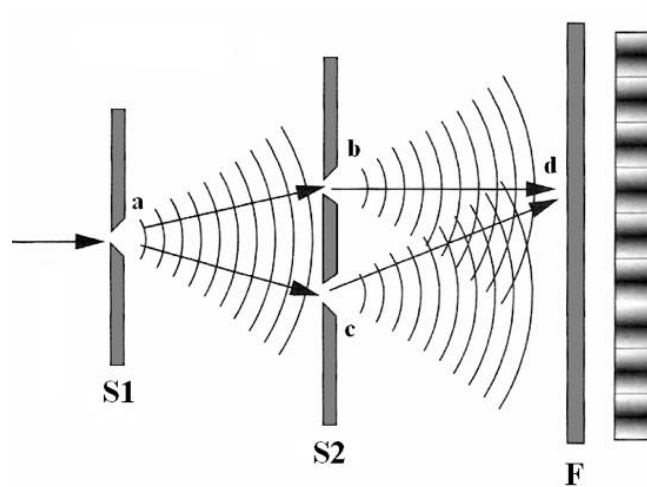


Figura 2.4 Experimento de la doble rendija de Tomas Young. Tomado de:

<https://renataquartieri.com/vestibular-2/exercicios/interferencia-de-ondas/>

Reconocer la luz como un cuanto de energía, hace pensar que la energía se distribuye continuamente, pero no es así y de acuerdo con la óptica geométrica las dimensiones de los aparatos utilizados para sus experimentos no son comparables con las longitudes de onda y por esta razón no se manifiestan propiedades ondulatorias en la propagación de la luz. Einstein en 1905 también planteo que existía una relación directamente proporcional entre la energía y la masa, por lo tanto a cada porción de energía con una masa inercial m_0 , se puede asociar un fenómeno periódico con frecuencia ν_0 , es decir de acuerdo con Einstein

$$E = h\nu_0 \quad (37)$$

Y segundo

$$E = m_0c^2 \quad (38)$$

Por lo tanto, de acuerdo con De Broglie

$$h\nu_0 = m_0c^2 \quad (39)$$

La hipótesis planteada por De Broglie, muestra la relación entre el movimiento de un objeto material y la propagación de una onda, lo cual da luces para poder unificar la naturaleza corpuscular y la ondulatoria con respecto a la radiación. Así

Observamos que una onda de fase rectilínea es congruente con el movimiento rectilíneo del cuerpo; y el principio de Fermat⁸ aplicado a la onda especifica un rayo,

⁸ El principio de Fermat fue propuesto por en 1657 para describir el fenómeno de refracción y afirmaba que la luz recorría un camino óptico entre dos puntos en el menor tiempo posible, es decir, planteaba un mínimo. En términos modernos, se dice que la luz sigue un camino óptico que es estacionario (posee un mínimo, un máximo o un punto de inflexión).

mientras que el principio de Maupertius⁹ aplicado al cuerpo material especifica una trayectoria rectilínea, que de hecho es un rayo para la onda. (De Broglie, 1924, p. 10)

Es decir, que las trayectorias de los corpúsculos son idénticas a las seguidas por los rayos de las ondas asociadas a ellos. Ahora la interacción de la luz con la materia implica comprender cómo se complementan las dos naturalezas y además por qué son inseparables, por lo tanto, se debe seguir profundizando en la relación entre energía y frecuencia. Esto lleva a indagar en torno a dónde se da el fenómeno periódico y cómo se distribuye la energía, es decir si no es continua, su distribución es en todo el espacio, pero se concentra en una pequeña región y forma unidades indivisibles o se distribuye en fase. De Broglie lo define de la siguiente manera:

“Un fenómeno periódico es visto por un observador estacionario que evidencia la frecuencia que aparece constantemente en fase con una onda que tiene una frecuencia que se propaga con una velocidad $v = c\beta$ ”. (De Broglie, 1924, p. 9)

Donde β es el factor relativista.

Para demostrar que hay una relación entre la naturaleza ondulatoria y corpuscular de la luz, De Broglie supone que de acuerdo con (39) existe en su constitución del cuanto de luz un fenómeno periódico con frecuencia inercial

$$v_0 = \frac{1}{h} mc^2 \quad (40)$$

Aquí, la onda de fase corresponde a la del cuanto de luz con frecuencia

⁹ El principio de Maupertius también conocido como el principio de mínima acción postula que la acción de un objeto material de masa m y velocidad v para ir entre dos puntos debe ser mínima.

$$v = \frac{1}{h} \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (41)$$

Esta relación implica algunas consideraciones con respecto a la masa inercial en función de la energía relativista. Aunque la teoría electromagnética afirma que el cuanto de luz no posee masa, se supone que si m_0 es la masa inercial finita, entonces por definición De Broglie acude a una función en cantidad de cuantos de luz, de la siguiente manera:

$$hv = \frac{\mu_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (42)$$

donde $\mu_0 = f(p)$ es la masa propia de cada cuanto de luz y $f(p)$ es una función del número de cuantos de luz y en caso particular de tener un solo cuanto de luz $f(1) = m$. Si de (42) se despeja β , se obtiene

$$\beta = \sqrt{1 - \left(\frac{f(p)c^2}{hv}\right)^2} \quad (43)$$

Es decir, que a frecuencias bajas $f(p) = 0$, cuando $p \rightarrow \infty$ y los cuantos de luz son encontrados en ensambles (parcelas de energía) asociados a la mismas ondas de fase y para frecuencias altas $f(p) = 1$ en cuantos de luz aislados, donde además la velocidad de los cuantos de luz es c cuando $v \rightarrow 0$. Es decir, que la radiación electromagnética se comporta como ondas de fase cuando se encuentra en movimiento y cuando se asume la masa en reposo su comportamiento es corpuscular en correspondencia con la teoría clásica. Por lo tanto, hay un límite en el cual la óptica geométrica (ondas de fase) se aproxima a la óptica ondulatoria (clásica) para longitudes de onda pequeñas.

El movimiento de los cuantos de luz donde $\beta = 1$ es donde se establece la caracterización dual de la luz, ya que asocia el principio de Fermat con el de mínima acción, es decir que las trayectorias de los cuantos de luz corresponden a las mismas de los rayos de las ondas de fase.

Sin embargo, como se observa en la figura 2.4, los rayos de luz al llegar a S1 o a S2 se difractan y la sombra refuerza su propagación haciendo que la luz se curve y no se mueva en línea recta, pero continúan con su movimiento y no cumpliendo con el principio de Fermat.

Esta desviación resulta del desequilibrio introducido por una pantalla en varias zonas cercanas de una onda. Por el contrario, Newton consideró que una pantalla en sí ejercía fuerza sobre los corpúsculos ligeros. Parece que hemos llegado a un punto de vista sintetizado: los rayos de onda se curvan como se ve en la teoría de ondas, pero a medida que los átomos de luz se mueven porque el principio de inercia de la luz ya no es válido, es decir, están sujetos al mismo movimiento del rayo de fase al que se unen; tal vez podamos decir que las pantallas ejercen fuerza sobre ellas en la medida en que una curva es evidencia de la existencia de tal fuerza. . . Si hoy nos parece probable que todas las ondas transmitan energía, así, por otro lado, la dinámica de las partículas de material puntual oculta sin duda la propagación de ondas en el sentido real de que el principio de mínima acción es expresable en términos de coherencia de fase. (De Broglie, 1924, p. 42)

Por lo tanto, existía una dificultad para poder interpretar aquello que sucedía en la interacción de la luz con las rendijas después de haberlas cruzado en términos de su propagación y poder saber su comportamiento si obedecía a ondas de fase o a corpúsculos de luz. De Broglie establece que antes de interactuar con las rendijas hay un comportamiento dual, pero que al interactuar con las rendijas desde la naturaleza corpuscular hay una fuerza que por un lado curva la luz y por otro lado permite que continúe su movimiento, ya que se manifiestan en el patrón de interferencia. Para comprender que sucedía en esta interacción es necesario agregar a las explicaciones que para este fenómeno ondulatorio debe haber unas ondas de fase y, además se debe:

Establecer una cierta vinculación natural, sin duda de carácter estadístico, entre ondas clásicas y la superposición de ondas de fase; que debe llevar inexorablemente a atribuir un carácter electromagnético a las ondas de fase para dar cuenta de los fenómenos periódicos. (De Broglie, 1924, p. 46)

La probabilidad de que después de la rendija se manifiesta la interacción de partículas materiales y los cuantos de luz en algún punto del espacio va a depender del promedio de intensidad del vector característico de la onda de fase, indicando que donde no hay interferencia (destructiva) su valor es cero, mientras que donde su valor es máximo indica interferencia (constructiva, sin embargo la interacción que se manifiesta en el patrón de interferencia no solamente se debe al valor máximo de intensidad, sino también se manifiesta donde la interferencia se anula. En este punto, De Broglie afirma

Para que la interferencia pueda producir regularidades, parece necesario coordinar varios átomos dentro de una fuente. Proponemos expresar esta coordinación mediante el siguiente principio: Una onda de fase que atraviesa cuerpos materiales los induce a emitir fotones adicionales cuya onda de fase es idéntica a la del estímulo. Por tanto, una onda puede constar de muchos fotones que retienen la misma fase. Cuando el número de fotones es muy grande, esta onda se parece mucho a la concepción clásica de onda. (De Broglie, 1924, p. 47)

La coherencia (igual fase), la cual para fotones que tienen igual onda de fase, el movimiento de cada uno es independiente y bajo las probabilidades son idénticos y es una de las hipótesis importantes en la construcción que realiza De Broglie, en relación con el número de cuantos de luz (fotones) y permiten evidenciar que los fotones son unidades indivisibles, además los fotones antes de cruzar las rendijas y después se comportan de la misma manera, donde la energía total asociada a la onda de fase es igual a la constante de Planck multiplicada por la frecuencia de la radiación electromagnética emitida desde la fuente.

Con respecto a la radiación del cuerpo negro, De Broglie indica que la imagen de emisión de radiación implica que

“Si se considera que la luz comprende fotones, la radiación del cuerpo negro puede considerarse como un gas en equilibrio con materia similar a un vapor saturado en equilibrio con su fase condensada”. (De Broglie, 1924, p. 63)

En una cavidad, la radiación electromagnética interactúa con las paredes de la cavidad, donde si dos o más fotones de igual fase se les asocia una misma onda su movimiento es el mismo, debido a que se encuentran en fase y el cálculo de las probabilidades es idéntica, por lo tanto, también en la radiación del cuerpo negro hay una correspondencia entre el movimiento de un cuanto de luz y la propagación de onda asociada (onda de fase) a estos y para garantizar la relación se debe cumplir la condición de coherencia.

En consecuencia, hablar del efecto fotoeléctrico, de la radiación del cuerpo negro y en general del comportamiento dual de la luz implica revisar a profundidad sobre las preocupaciones de científicos como Hertz, Hallwachs, Lenard, Einstein, De Broglie, entre otros, los cuales en la búsqueda de comprender la naturaleza realizaron aportes en nuevas maneras de dialogar con la naturaleza, pero además demostraron que se debían construir nuevas explicaciones porque no se tenía una experiencia previa que sustentara el fenómeno de interacción de la luz con la materia. Además, como docente, me permite comprender el experimento de la doble rendija, en la necesidad de acudir a lo cuántico, construyendo una base fenomenológica como introducción a la mecánica cuántica, la cual es una de las necesidades que como profesor identifiqué y posibilitó organizar el fenómeno de interacción de la luz con la materia, es decir, identificar cualidades que lleven a establecer magnitudes y

relaciones lógicas, configurar la representación del fenómeno y generar procesos de formalización.

2.5 Consideraciones en la introducción a la mecánica cuántica

Como docente al momento de introducir a los estudiantes en la comprensión de los fenómenos a nivel cuántico, se hace necesario reconocer el contexto histórico en el cual se dan sus formulaciones, pero además de tener presente que las teorías no están acabadas como lo presentan los libros, ni tampoco están ahí sin poder ser juzgadas. El camino recorrido en el presente capítulo con cada uno de los diferentes científicos permitió en primer lugar hablar del fenómeno de interacción de la luz con la materia como elemento constituyente en la comprensión de la naturaleza dual de la luz, a partir de los fenómenos de emisión y transformación de la luz, en segundo lugar saber que para el siglo XIX la naturaleza ondulatoria reforzada por James Clerk Maxwell reinaba en las explicaciones de los científicos, en torno a la comprensión de la luz, sin embargo, la interacción de la luz con la materia hizo posible volver a considerar la naturaleza corpuscular para explicar por qué al irradiar luz ultravioleta sobre los metales se producían efectos que desde los clásicos no se lograban explicar (la no dependencia de la intensidad de la luz para producir una corriente, la distribución discreta de la energía, al interactuar la luz con el metal no hay tiempo de retraso y la existencia de una frecuencia umbral para que se produzca el efecto fotoeléctrico).

Otro de los fenómenos analizados con los autores es el de la radiación del cuerpo negro, donde Max Planck, dedujo cómo cambia el espectro de emisión cuando se varía la temperatura de un cuerpo y para esto supuso que la radiación producida por una cantidad de

resonadores se distribuía de manera discreta contrario a la teoría ondulatoria de Maxwell y propuso que la energía era directamente proporcional a la frecuencia del resonador.

Los fenómenos del efecto fotoeléctrico y la radiación del cuerpo negro permiten comprender la interacción de la luz con la materia, pero además da lugar a recurrir a la naturaleza corpuscular para comprender los fenómenos asociados a la emisión y transformación de la luz. El carácter corpuscular de la luz complementado con las explicaciones de A. Einstein permitió que se pudiera ampliar la naturaleza de la luz y sus estudios dirigieran las investigaciones llevadas a cabo por De Broglie para complementar e indicar que a los cuantos de luz se le puede asociar una onda y viceversa como ya lo había demostrado A. Einstein.

La naturaleza dual de la luz como introducción a la mecánica cuántica da cuenta de poder entender cómo se hace necesario acudir a lo cuántico en la comprensión del experimento de la doble rendija propuesto por Young donde el comportamiento dual de la luz implica establecer un diálogo para organizar el fenómeno, el cual no se hace desde una mirada particular sino como una formulación, bajo la inseparabilidad de las naturalezas corpuscular de A. Einstein y la ondulatoria. Esto permite al profesor hacer una propuesta que genera en los estudiantes, la necesidad de comprender la interacción de la luz con la materia, desde la construcción de magnitudes como son la frecuencia y la energía y en cuya metodología implica que se pueda construir una base fenomenológica alrededor de los fenómenos asociados al efecto fotoeléctrico y la radiación del cuerpo negro para que los estudiantes desarrollen unas actividades experimentales y les permitan generar preguntas, organizar el fenómeno, plantearse un problema conceptual, proponer actividades, y acceder a nuevo conocimiento que no sería posible pensar desde cualquier contexto, donde se

conectan con ideas alrededor de la interacción de la luz con la materia en la enseñanza de la mecánica cuántica con estudiantes de educación media.

CAPÍTULO 3

La perspectiva fenomenológica como ruta en la introducción a la mecánica cuántica

Dentro del quehacer pedagógico la actividad experimental siempre ha estado presente en la enseñanza de las ciencias y particularmente en la física. Sin embargo, el papel y las concepciones bajo las cuales se articula en los procesos de enseñanza – aprendizaje son variados y en algunos casos se utilizan más como comprobación de teorías y no como

espacios donde se construyen fenomenologías que llevan a procesos de formalización¹⁰. En la dinámica de construcción de explicaciones que se dan en el aula se busca que la actividad experimental se privilegie como introducción a la mecánica cuántica en estudiantes de grado undécimo, la cual permite orientar la configuración y comprensión del fenómeno de interacción de la luz con la materia, brindando un sentido y significado en la enseñanza de las ciencias. Por lo tanto,

La actividad experimental no puede ser reducida a hechos de observación ni a ejemplificar las aplicaciones de la teoría, pues no basta con poner de presente algunas organizaciones o montajes experimentales para que se deriven de allí las construcciones teóricas o se comprendan las que se han dado en la ciencia. (Sandoval et al, 2006, p. 12)

Esta ruta debe vincular el papel del experimento como base en la construcción de explicaciones para científicos y en el aula, construcción de fenomenologías, planteamiento de problemas conceptuales y el desarrollo de procesos de formalización que organizan el fenómeno y permitir ampliar la experiencia sensible. A continuación, se presentan los elementos que suprimen la dicotomía entre experimento y teoría, los cuales estructuran la construcción de la base fenomenológica sobre la interacción de la luz y la materia y fundamentan el uso de actividades experimentales en la enseñanza de las ciencias.

3.1 La observación y el papel de la percepción

El conocer del ser humano siempre ha estado permeado por el cómo me relaciono con el mundo exterior y desde este escenario se ubica la manera de percibir y ampliar la experiencia del sujeto. Además, las ciencias empíricas se justifican en la percepción

¹⁰ No necesariamente se hace referencia a una formalización puramente matemática, sino a la construcción de cualidades que dan cuenta del fenómeno y con las cuales se presentan magnitudes, estableciendo relaciones entre ellas que organizan la experiencia y aportan elementos en la enseñanza de las ciencias.

sensorial, sin embargo, para los fenómenos cuánticos, el sujeto no cuenta con una experiencia previa (los instrumentos que surgen de la organización del fenómeno y las magnitudes no son directamente percibidas por los sentidos), y por ende no basta con traer conceptualizaciones antes de observar, lo cual implica construir un campo o dominio fenomenológico, donde cobren sentido las relaciones conceptuales establecidas. La observación es un proceso intencionado que se dinamiza en la búsqueda de interpretaciones y en las formas como el sujeto dialoga con lo que es observado (se hace conciencia del mundo exterior). En la mecánica cuántica, el acto de observar va de la mano con el proceso de medida y es allí, donde, a pesar de que el sujeto, quien observa, no cuenta con una experiencia inicial, “el mundo” se presenta como resultado del proceso de medición, bajo una intencionalidad del sujeto por conocer y organizar el fenómeno. Observar un sistema cuántico, implica que hay un aparato de medida que adquiere significado de corte teórico en la integración con la unidad sujeto – fenómeno. La realidad es la que es, como resultado de la medida y lo observable cuánticamente no es sensible al ojo humano, es medible.

El acto de observar implica considerar todos los elementos, acciones que posibilitan el diálogo del mundo exterior con el sujeto, así como colocar en juego la experiencia previa para ser ampliada y formalizada, en sí, la percepción no es algo desnudo ni inmediato, sino que implica reconocer(intención) un conjunto estructurado de relaciones, cualidades, objetos, los cuales son interpretados por quien observa, vinculando la actividad teórica a la percepción.

Luego, la observación parte de la intención razonada (se sigue un orden conceptual) del sujeto, es estructurada, organizada y se convierte también en un campo de efectos que permite hablar de lo que no se observa directamente y es allí donde en primer lugar se

caracteriza un fenómeno por medio de una noción o cualidad como estrategia de organizar la experiencia; en segundo lugar, surge la necesidad de medir esa cualidad y se convierte en una magnitud; y tercero se construyen aparatos de medida como extensión de la percepción para cualificar y cuantificar esa magnitud. Por lo tanto, como afirma Malagón

Para que una observación científica sirva de algo ha de ser en contra o a favor de una idea: la razón de ser del observar no está únicamente en recoger y acumular observaciones sino en “buscar” y “sacar a la luz” un cierto orden existente en los hechos. (2014, p. 98)

De ahí, que la observación se estructure en el experimento que no espera comprobar teorías, sino que en la producción del fenómeno (este no existe, se construye en una intención del sujeto) a ser observado. En esta investigación se diseñan una serie de experimentos que se delimitan por un esquema teórico que favorece organizar explicaciones sobre la interacción de la luz con la materia en particular en los fenómenos de absorción y transformación de la luz, donde no solo se busca hablar de la interacción, sino en cómo se genera un campo de efectos, se identifican cualidades, se construyen magnitudes, se elaboran aparatos, que dan lugar a organizar nuevas experiencias, revelan una relación sistémica de propiedades, a formalizarlas, en poder hablar de la luz considerando su comportamiento dual en la explicación del experimento de la doble rendija como introducción a la mecánica cuántica.

A la vez, la observación también es más que la acción que realiza el ojo, es una extensión de una mente que interpreta (continuo) y le da sentido a lo observado, no siempre se ve lo mismo y por ende la observación debe ser inteligible, pero ¿Cómo organizar explicaciones, a partir de lo observado? Es ahí, donde el estudio de la relación entre lo percibido y el lenguaje, adquieren relevancia.

“El papel de la percepción y del lenguaje dentro de los procesos de formalización para ampliar y consolidar nuestra reflexión sobre los elementos epistemológicos y cognitivos implicados en esta actividad¹¹.” (Sandoval et al, 2018, p. 12)

Luego, la construcción de fenomenologías en la enseñanza de las ciencias se estructura cuando se logra establecer una relación entre la percepción, la experiencia sensible y el lenguaje con los constructos conceptuales, brindando una continuidad en la organización de lo que se percibe en la formalización de explicaciones y permite hablar de otras maneras alrededor del fenómeno.

3.2 Perspectiva fenomenológica

En relación con lo fenomenológico se debe considerar un proceso mediante el cual el sujeto desde su conciencia es quien construye el fenómeno en la necesidad de conocer y por lo tanto establece un diálogo dinámico en doble dirección, es decir que bajo esta perspectiva se debe prestar atención a:

Los procesos de diferenciación fenoménica y sistematicidad de las elaboraciones, que permiten al sujeto construir el fenómeno y dar cuenta de las condiciones que lo hacen posible, de las variables que determinan sus cambios y de los procesos que lo constituyen. (Sandoval, et al, 2009, p. 11)

En ese sentido, se consolida una unidad entre el sujeto y el fenómeno que implica describir e interpretar la comprensión de la fenomenología desde la actividad experimental que se construye bajo una serie de experiencias organizadas y de una observación intencionada que se establece en una relación dinámica con una comprensión conceptual.

Así,

¹¹ *Organización de explicaciones.*

“El sujeto se ve en la necesidad de proponer explicaciones, diseñar experimentos, anticipar eventos, elaborar generalizaciones y definir criterios metodológicos que enriquecen las explicaciones al fenómeno conocido.” (Sandoval et al, 2009, p. 11)

La unidad sujeto – fenómeno es una relación que se formaliza en una búsqueda por dar significado a lo que es observado, y en ese sentido se estructura no como algo conocido, sino como el proceso que permite dar significado a la organización del fenómeno.

“Aceptemos que, en el dominio cuántico, el sujeto debe ser concebido como “incorporado”, estableciéndose así una suerte de continuidad material entre éste y el objeto cuántico. Esto no implica que el sujeto, junto con sus extensiones instrumentales, deba ser tratado exclusivamente como un *objeto* de la física (especialmente de la física cuántica); pues esta confusión de dos categorías epistemológicas sólo daría lugar a una serie de paradojas intratables, cuyo mejor ejemplo es el célebre problema de medición de la mecánica cuántica. En cambio, la incorporación del sujeto motiva la introducción de un nuevo tipo de corte sujeto - fenómeno, que no separa lo no físico de lo físico, ni un dominio espacial de objetos de otro dominio espacial, sino el “*proceso de creación de significado*” de lo que *significa*. Aquí, lejos de obligarse a atribuirle al sujeto el estatus de algún significado del fenómeno, su incorporación se interpreta como una contribución al proceso de creación de significado. Junto con la distinción de Husserl entre *Leib* [cuerpo vivido] y *Körper* [cuerpo objetivado], el cuerpo mejorado instrumentalmente del observador mecánico cuántico se toma como una condición previa estructurada del conocimiento en lugar de un objeto conocido. En otros términos, al sujeto incorporado se le atribuye una posición *trascendental*: la posición de una estructura básica de cualquier acto de cognición, en lugar de un elemento cognoscible.” (Heelan, 2016, p. 9)

Otro de los elementos que permiten hablar de lo fenomenológico es que el fenómeno no se conoce antes de ser problema de estudio para el sujeto ni se esconde como un ente metafísico o realidad oculta, sino que más bien, se construye en la búsqueda de solución a interrogantes y la necesidad del sujeto por hacer una imagen inteligible de mundo y en consecuencia evoluciona con la comprensión del sujeto tanto en la interpretación como en las explicaciones y lenguaje (modos de hablar) a que se acude permitiendo hacer organizaciones, construir magnitudes y establecer cualidades como una opción en la enseñanza de la mecánica cuántica e implican romper con la dicotomía teoría – experimento.

Así en palabras de Malagón (2010), y cuyos análisis han sido corroborados por otros autores, la actividad experimental en la enseñanza de las ciencias está orientada a:

- Ampliar la experiencia sensible que se diferencia sustancialmente de aquella dirigida a contrastar hipótesis, donde los resultados experimentales se pueden prever a partir ya sea de una elaboración teórica propiamente dicha o de las predicciones que se pueden derivar de la organización lograda de la experiencia cotidiana.
- Detectar el efecto de propiedades, a visualizar fenómenos inaccesibles y a exhibir rasgos y peculiaridades de los fenómenos que se constituyen en su misma representación.
- Hacer uso de la organización conceptual lograda para analizar la operación de dispositivos y mejorar su funcionamiento y avanzar en la exploración de un fenómeno.
- Desarrollar procesos de medición y aplicación de principios generales que pasan del plano cualitativo al cuantitativo con el que se matematizan las cualidades observadas.
- Concretar un planteamiento teórico.

En tanto, la perspectiva fenomenológica articula la actividad experimental a la producción teórica, la cual se dinamiza con la teoría en la enseñanza de las ciencias implicando una comprensión del fenómeno estudiado, es decir, se requiere de una fenomenología porque los fenómenos necesitan que un sujeto en forma intencionada establezca una relación de doble vía, en la necesidad de organizar lo que se quiere conocer.

3.3 La base fenomenológica

La perspectiva fenomenológica propuesta se enfoca en dos elementos a considerar: primero la actividad experimental, la cual se fundamenta en los procesos de conceptualización y segundo la fenomenología, desde la cual se analiza y se estructura el fenómeno. Esta perspectiva supone considerar esquemas conceptuales que deben estar articulados con la actividad experimental, que permiten organizar la experiencia sensible y configurarla con el mundo natural.

Los esquemas conceptuales son considerados como parte de una experiencia inicial u organización teórica y orientan la actividad experimental en la cual el sujeto amplía su experiencia y le permiten organizar el fenómeno y llegar a procesos de formalización. Por lo tanto, construir la base fenomenológica implica identificar cualidades, construir magnitudes, formas de medir y procesos de formalización, desde la cual se reconoce que, en el fenómeno de interacción de la luz con la materia, el sujeto no cuenta con una experiencia inicial y por lo tanto se requiere de su construcción. En esta dirección, se busca generar acciones que vinculen efectos, relaciones, lenguajes para asociarlos en la organización del fenómeno.

Pero ¿cómo construir la base fenomenológica que dé cuenta del fenómeno de interacción de la luz con la materia? Para esto se necesita considerar una organización de actividades experimentales intencionadas (que generen preguntas) y que posibiliten escenarios de reflexión favoreciendo la comprensión de la misma actividad y el vínculo de efectos sensibles, los cuales inducen a otras organizaciones, delimitaciones y descripción de relaciones sobre la construcción de la base fenomenológica, que se estructura en la

Construcción de una serie de experiencias o de actividades con la intención de comprender la riqueza del fenómeno y determinar las magnitudes que permitan hacer relaciones explicativas, en donde más que partir de modelos de partículas se requiere más bien examinar qué tipo de magnitudes son pertinentes, cómo se pueden medir y cómo se relacionan. Es claro que la medida está ligada a un instrumento; pero es la organización de una fenomenología la que arroja los elementos necesarios para la construcción del aparato de medida. (Sandoval et al, 2018, p. 42)

Así, al construir la base fenomenológica en la organización de actividades experimentales intencionadas se busca organizar el fenómeno y caracterizar las cualidades que permiten la construcción de magnitudes y la elaboración de aparatos de medida.

3.3.1 Organización del fenómeno

La organización del fenómeno parte de poder identificar cualidades (organizar la experiencia sensible), las cuales permiten plantear relaciones y configurar el fenómeno que lleva a una formalización, y por ende, superar la dicotomía entre lo cuantitativo y lo cualitativo, ya que no se establece un límite en la organización de explicaciones sino que se siguen reorganizando hasta llegar a las formas más abstractas que se elaboran a través de la acción y la lógica del sujeto, en la cual se establecen relaciones.

Luego, en el acto de observar se perciben los efectos que ocurren en las interacciones de unas cosas con otras y se generan ideas que obligan a pensar cuál es el criterio de organización de lo observado y cómo se interpreta lo que se observa, lo cual implica establecer unas relaciones de coordinación (Sandoval et al, 2014)

Por lo tanto, en la organización del fenómeno, el experimento:

Genera la ampliación de la experiencia y dinamiza la teorización de esa experiencia; es decir, poner en juego algunas actividades experimentales permite a la vez transformar la experiencia y elaborar, hacer, explicaciones teóricas. Esas

explicaciones, a su vez, permiten generar nuevas experiencias y nuevas formas de desarrollarla. En este sentido es importante insistir en que no existen esquemas conceptuales que no estén articulados a alguna experiencia sensorial, incluso en la matemática que es la disciplina teórica por excelencia. (Malagón, Sandoval, Ayala, 2013, p. 128)

El fenómeno se organiza en la elaboración de actividades experimentales con la intencionalidad del sujeto de dinamizar lo teórico con lo experimental y poder elaborar explicaciones, generar nuevas problemáticas, proponer otras experiencias permitiendo formalizar el fenómeno.

3.3.2 Caracterización de cualidades y construcción de una magnitud

La dinámica de la construcción de magnitudes permite organizar el fenómeno, establecer relaciones entre cualidades (frecuencia y energía) que dan cuenta de lo cambiante del fenómeno y aportan en la constitución de nuevos dominios fenomenológicos como la mecánica cuántica, dando lugar a procesos de organización y construcción de efectos sensibles que se formalizan en explicaciones.

La intencionalidad de construir el campo fenomenológica lleva a identificar cualidades que se diferencian y las cuales permiten hacer distinciones de acuerdo con un campo de efectos. En este sentido, esta disposición favorece el poder realizar clasificaciones, ordenaciones que enriquecen la experiencia y generan un primer momento para organizar el fenómeno.

En ese proceso se construyen palabras para referirse a lo que causa un efecto y su diferenciación de la cualidad asignada y en la profundización de establecer relaciones se llega

a otras magnitudes que son producto de la organización de las cualidades y por lo tanto se construye un lenguaje que produce modos diferentes de hablar del fenómeno.

Es importante señalar la necesidad de generar esquemas teóricos a partir de las generalizaciones, ya que

Las generalizaciones son grandes síntesis teóricas en las cuales ya no se trata de dar cuenta de situaciones puntuales sino de comunicar delimitaciones a las cuales se ha llegado. Sin embargo, tales generalizaciones en la enseñanza de las ciencias pierden su sentido si no se ponen en relación con la experiencia sensible de los sujetos y con la organización y ampliación de tal experiencia. (Malagón et al, 2013, p. 132)

En consecuencia, la construcción de la fenomenología sugiere primero identificar las cualidades y organizarlas, segundo construir unidades de medida y aparatos y tercero los procesos de formalización, donde las magnitudes deben estar ligadas a la base fenomenológica y con lo cual se elaboran aparatos que caracterizan y organizan el fenómeno desde las relaciones que se establecen entre ellas mediante un análisis del campo de efectos.

La construcción del aparato de medida surge en la necesidad de elaborar unidades de medida y poner condiciones acerca de la magnitud a medir para saber cuándo es más o cuándo es menos, por lo tanto, esta tiene un carácter dual es cualitativa porque permite caracterizar la cualidad y segundo es cuantitativa porque se establece una relación de orden y comparación. Luego, la medición caracteriza la actividad experimental, lo cual implica la construcción de una cualidad y permite profundizar en una articulación con su fenomenología, poniendo de manifiesto que la cualidad es producto de la organización de la experiencia sensible que se dinamiza hasta llegar a una organización conceptual. En ese sentido, para construir un aparato de medida

Se tiene una organización muy fuerte del fenómeno que se está estudiando y aquí no se trata de problemas de precisión o de exactitud, sino más bien de cómo se argumenta el funcionamiento del aparato para hablar de un determinado fenómeno. (Malagón et al, 2013, p. 133)

Así, la construcción de magnitudes y elaboración de aparatos estructuran el campo fenomenológico permitiendo organizar explicaciones, establecer generalizaciones alrededor del fenómeno estudiado y servir como extensión de los sentidos que facilitan la organización conceptual como fin de la organización de la experiencia sensible.¹²

Elegir una magnitud no es lo mismo que elegir lo que se debe medir con ella. En la actividad experimental no se mide todo lo que sucede en el experimento, al sujeto lo guía una hipótesis (energía, frecuencia). El instrumento de medida es algo más que un mero número, permite establecer relaciones, se concreta en la teoría de lo que se está midiendo y es allí donde adquiere significado para quien está midiendo. Por lo tanto, la actividad experimental busca organizar la experiencia y dentro de la misma organización se construyen magnitudes que favorecen la organización de explicaciones y la formalización de estas.

Sin embargo, en la mecánica cuántica, la intencionalidad sujeto - fenómeno – instrumento de medida, adquiere relevancia y es trascendental en el acto de observar, porque esta acción vincula la construcción de significado de lo observable (lo que es medible) y da lugar a la presencia de lo que es observado, facilitando al sujeto conocer algo que previamente

¹² Galileo en sus experimentos del plano inclinado planteo su hipótesis considerando la relación entre distancia y tiempo delimitando los experimentos a estos parámetros y estudiando el movimiento en términos de proporciones, condicionando los experimentos, los aparatos de medida como su interpretación. (Malagón, 2014, Pág. 100)

no se conocía, pero que se ve permeado por la condición de lo que es medible y a la vez condiciona nuevas observaciones. Así,

“En la mecánica cuántica, el observador es el sujeto humano vinculado con cualquier aparato externo que se elija para los propósitos de una medición de mecánica cuántica. Los observables de mecánica cuántica son muchos y no todos son compatibles entre sí, ya que la instrumentación externa de un tipo (p. ej., para la localización) no se puede utilizar adecuadamente simultáneamente con instrumentación externa de otro tipo (p. ej., para medir impulso). A la multiplicidad de los observables de la mecánica cuántica, corresponde una multiplicidad de lenguajes descriptivos, que no pueden usarse todos simultáneamente. El observable y lo observado están separados por un corte teórico, el cual es un asunto dinámico ligado a la decisión del científico” (Heelan, 2016, p. 145)

3.4 Los procesos de formalización

En el proceso de formalización no se busca llegar solamente a una formalización matemática, sino que permita hablar del fenómeno desde la construcción de relaciones, cualidades, palabras y a través del cual, la actividad experimental es estructurante en la construcción de explicaciones facilitando la comprensión del fenómeno.

La relación entre el experimento y los procesos de formalización implican considerar algunos elementos:

1. Los esquemas conceptuales los cuales surgen de una experiencia previa o construcción teórica permiten construir una base fenomenológica.
2. Los esquemas conceptuales están articulados con la experiencia sensible y favorecen su organización como la configuración del mundo físico. (Malagón et al, 2013, Pág. 128)

Estos aspectos como intencionalidad pedagógica posibilitan examinar las actividades experimentales y los procesos de formalización que se direccionan en la construcción de la

base fenomenológica. Por lo tanto, la construcción de la base fenomenológica en la presente investigación tiene como intencionalidad ampliar y caracterizar la interacción de la radiación electromagnética con la materia en los fenómenos de absorción y transformación de la luz

Es decir, comprender el fenómeno de absorción y transformación de la luz en interacción con la materia supone diseñar unas actividades experimentales cuyo fin es identificar que magnitudes son pertinentes dentro de la organización del fenómeno y cómo se relaciona para construir un aparato de medida que facilite organizar la fenomenología, donde al referirnos al fenómeno, implica generar procesos de formalización, es decir explicitar las relaciones que se construyen en el diálogo con el fenómeno.

3.5 El experimento en la enseñanza de las ciencias como construcción de fenomenologías

En la observación experimental se fijan unos criterios que organizan el acto de observar: el sistema de medida, el marco teórico (la interpretación se hace con el lenguaje de medida y delimita el experimento) y el instrumento de medida.

El experimento debe construirse en relación con lo conceptual, modificándose e interactuando mutuamente: el experimento como planteamiento de problemas conceptuales de la física (el comportamiento dual de la luz en el experimento de la doble rendija) implica construir actividades experimentales que van mucho más allá de la simple interacción de la luz con la materia, y busca también comprender los fenómenos de absorción y transformación de la luz en su interacción con la materia, es decir se plantea una pregunta y se analiza una posibilidad de respuestas. En el experimento de la doble rendija, lo que se observa son manchas en la pantalla, pero ¿cómo a partir de estas evidencias llegamos a pensar en la

existencia de los cuantos de luz? ¿cómo a partir de estos indicios se construyen explicaciones como las dadas por la física moderna?

Responder a estas preguntas, lleva a construir un fenómeno, desde el cual se proponen unas actividades experimentales que se organizan con la intención de dar respuesta y construir una base fenomenológica. Por lo tanto, el uso de experiencias permite ampliar la experiencia fenomenológica, determinar elementos a los que se refiere la teoría, diseñar experiencias en las que se cuenta con esos elementos) o de hechos de observación que se organizan con la estructura conceptual y lo cual justifica el papel del experimento en la enseñanza de las ciencias y le imprime valor a las acciones que realiza el docente en el aula.

El experimento da lugar a un campo de efectos sensibles y de fenómenos, pero a la vez permite dinamizar lo conceptual y la construcción de magnitudes está ligada a la organización de la experiencia que se concreta en la formalización de explicaciones sobre el campo fenoménico. Esta dinámica posibilita la constitución y la ampliación de la base fenomenológica, enriqueciendo la actividad científica en el aula que se problematiza. Por lo tanto, Sandoval et al afirman que

En el ámbito de la enseñanza de las ciencias la actividad experimental juega un papel importante, en especial su íntima relación con las organizaciones conceptuales que se van construyendo. Esta concepción rompe con la oposición experimento-teoría, y así se puede afirmar que no se pueden establecer antagonismos o delimitar ideas de forma absoluta, aunque se reconozca que el experimento tiene dinámicas propias. Ni el experimento comprueba la teoría ni la teoría puede existir sin la referencia a lo sensorial. (2018, p. 11)

La actividad experimental tiene que ver con la construcción y comprensión de fenomenologías, las cuales permiten ampliar y organizar la experiencia, así como estructurar procesos de formalización, conceptualización y construcción de conocimiento en el aula, es

allí donde toma total relevancia y no en escenarios de verificación de relaciones conceptuales o comprobación de teorías.

Al respecto, es pertinente tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La construcción y comprensión de fenomenologías: para el caso del fenómeno de interacción de la luz con la materia y particularmente en los fenómenos de absorción y transformación de la luz no se cuenta con una experiencia sensible y en consecuencia se debe construir una base fenomenológica, es decir generar acciones que permitan caracterizar el fenómeno y desde los cuales vincular la experiencia sensible y la fenomenología.
- La ampliación de la experiencia: como no se cuenta con una experiencia sensible, entonces se debe construir un campo de efectos, relaciones y lenguajes en los cuales se logre hablar del fenómeno de interacción de la luz con la materia.
- La construcción de formas de hablar del fenómeno: en la relación fenómeno – sujeto la experiencia se amplía, pero a su vez esta relación evoluciona facilitando que los modos de hablar se transformen, se construyen descripciones y realizan representaciones de lo percibido que permiten hablar del fenómeno.
- La concreción de supuestos conceptuales: la construcción de escalas de medida y la elaboración de aparatos son aspectos que sirven en la constitución y ampliación de la base fenomenológica que se vinculan con el planteamiento de problemas conceptuales y orientan los procesos de formalización (Malagón et al, 2013, p. 125 - 126)

Así, la actividad experimental como organización de experiencias permite determinar un campo de efectos sensibles y de condiciones que posibilitan producirlos, modificarlos en

la dinámica de establecer relaciones entre las cualidades. También, la actividad experimental bajo la perspectiva fenomenológica, permite considerar otros escenarios que dan lugar a la constitución de nuevos campos fenoménicos y en ese sentido la actividad experimental se estructura en las relaciones y organizaciones conceptuales de planteamientos teóricos.

CAPÍTULO 4

Construcción de la base fenomenológica sobre la interacción de luz con la materia

Esta propuesta parte de vincular nuestra experiencia sensible en un diálogo intencionado con el fenómeno de interacción de la luz con la materia, el cual orienta la actividad experimental desde una mirada dinámica que requiere que los estudiantes identifiquen cualidades, construyan magnitudes como la frecuencia, la noción de energía y reconozcan las dificultades que se plantean con la medida en la introducción a la mecánica cuántica.

Esta manera de proceder es lo que llamamos la construcción de la base fenomenológica que dentro de la investigación se articula en la introducción de la mecánica

cuántica y cuyo fenómeno a estudiar es la interacción de la luz con la materia, del cual el sujeto no cuenta con una experiencia inicial y con esta construcción se busca generar acciones que vinculen nuevas ideas y organizaciones en la formulación de explicaciones, en la comprensión del fenómeno, así como una nueva aproximación en la enseñanza de la mecánica cuántica por parte del docente. En ese sentido se han diseñado actividades experimentales que permitan que los estudiantes comprendan la interacción de la radiación electromagnética con la materia en los fenómenos de absorción y transformación de la luz.

4.1 Diseño de la propuesta de aula

En las actividades experimentales presentadas, los estudiantes se organizaron en grupos de tres personas y se llevó a cabo un registro de las discusiones, explicaciones, preguntas, representaciones y organizaciones en una bitácora, la cual deberían mostrar al final de las sesiones. Además, el docente orientó sesiones de discusión donde se hicieron preguntas y se cuestionaron las ideas sin mencionar verdades o respuestas, ni planteamientos teóricos ya establecidos, los cuales condicionarían las explicaciones de los estudiantes y más bien se orientó el espacio para que estos fueran resultado del desarrollo de cada una de las actividades experimentales. Después de cada encuentro grupal se sustentaban los hallazgos y reflexiones a las que se llegaron, y que servirían para los demás grupos, cuya socialización favorecería la construcción de explicaciones en cada uno de los momentos y poder avanzar hacia otras experiencias dentro de la intención de organizar explicaciones alrededor de la interacción de la luz con la materia.

La organización de la actividad experimental se dividió en cuatro fases o momentos de acción como construcción de la base fenomenológica: el primer momento es la actividad exploratoria, donde se busca que los estudiantes reconozcan el fenómeno de absorción de la

luz y realicen una aproximación a la cualidad de frecuencia; el segundo momento tiene como intención establecer relaciones entre las magnitudes de frecuencia y energía en la radiación electromagnética; el tercer momento está encaminado a la comprensión de la interacción de la luz con los metales y como cuarto momento está la construcción de procesos de formalización de la interacción de la luz con la materia bajo el comportamiento dual.

La ruta de aula se plantea desde la intencionalidad del sujeto en establecer un encuentro con el fenómeno y cuyas acciones se encaminan en la construcción de la base fenomenológica y se tiene en cuenta que la enseñanza de la mecánica cuántica dentro de la propuesta tiene un componente epistemológico que permite realizar una recontextualización de saberes bajo un recorrido de los científicos que se interesaron por comprender el fenómeno de interacción de la luz con la materia: Heinrich Hertz, Max Planck, Albert Einstein y Louis De Broglie que permiten organizar el fenómeno en la construcción de un campo de efectos, acciones explicaciones que dan cuenta del fenómeno. También muestra las actividades experimentales, junto con unos criterios de análisis y discusión que complementan y estructuran la organización del fenómeno, donde el sujeto amplía la experiencia y le brinda nuevos elementos para abordar otros conocimientos científicos.

4.1.1 Etapas e intención de la experiencia

Las etapas se diseñaron como parte estructurante de la construcción de una base fenomenológica donde los estudiantes no cuentan con una experiencia directa en torno a lo cuántico y desde allí cada una de las actividades experimentales van articuladas, de tal manera que ellas permiten ampliar la experiencia en cada estudiante. Inicialmente se presenta el reconocer cómo la luz interactúa con la materia, bajo los fenómenos de absorción y emisión

de radiación, permitiéndole a los estudiantes ir más allá e identificar nociones, conceptos y la construcción de magnitudes que lleven a organizar el fenómeno.

De acuerdo con la organización de la construcción de la base fenomenológica, se presentan las tablas 1, 2, 3, 4 con la intención de cada una de las fases, un diálogo histórico – crítico que orientará la construcción de explicaciones desde lo experimental, una descripción de cada una de las actividades y unos criterios de análisis y discusión para cada una de las actividades experimentales. Cada momento contó con una introducción a la parte experimental y unos objetivos, los cuales direccionaron el desarrollo de cada una de las actividades y el docente acompañó cada uno de los momentos y luego de haber desarrollado las actividades experimentales, se plantearon espacios de discusión donde los estudiantes socializan sus explicaciones, las preguntas que les surgieron y nuevas propuestas experimentales para dar cuenta de sus indagaciones y de la organización del fenómeno.

Fase I: Reconociendo el fenómeno de absorción de la luz y la búsqueda de la frecuencia

Momento I: ¿Cómo la luz interactúa con el globo y la goma?

Intención	Diálogo histórico – crítico	Descripción	Criterios de análisis y discusión
En esta primera fase se realiza una aproximación en la comprensión de la interacción de la luz con la materia, con el	A finales del siglo XIX, los científicos consideraban la luz bajo dos naturalezas, la corpuscular propuesta por Newton y la ondulatoria propuesta por Huygens y complementada con	PARTE I 1. Con ayuda de luz solar y globos de diferentes colores (blanco, rojo, azul, verde, amarilla, roja, naranja, negro), poner a interactuar luz natural y los globos. 2. Con ayuda de una lupa y globos de diferentes colores, poner a	Dentro de esta primera fase surgen preguntas alrededor; primero de reconocer que hay una interacción de la luz con los globos y desde allí se construyen explicaciones bajo un campo de efectos y relaciones en torno al color y su influencia

<p>fenómeno de absorción, donde se busca que los estudiantes observen y se cuestionen acerca de la interacción de la luz con globos y gomas de diferentes colores, donde se identifiquen los fenómenos de reflexión, refracción y absorción de la luz. Además de construir magnitudes (frecuencia) asociadas a la absorción de la luz.</p>	<p>Maxwell en su carácter electromagnética, con las cuales se lograban explicar algunos fenómenos de la luz en la interacción con la materia, bajo consideraciones macroscópicas.</p>	<p>interactuar luz natural, lupa y globo.</p>	<p>en la interacción de la luz con los átomos del material de los globos. Dentro de las preguntas tanto del docente como el estudiante, se pueden mencionar: ¿Cómo influye la lupa en la interacción de luz y el globo? ¿Qué cambios sensibles identifica en cada una de las bombas? ¿Por qué se dan esos cambios? ¿Se puede ordenar de mayor a menor la influencia de la luz en cada bomba? ¿Por qué se explotan las bombas de colores y no la blanca?</p>
		<p>PARTE II Con ayuda de gomas de diferentes colores y un láser, ponerlo en interacción con cada goma de diferentes colores y cualificar lo observado.</p>	<p>En esta segunda actividad experimental, los estudiantes ya saben que hay una interacción de la luz con la materia, pero se requiere avanzar más en la comprensión de la luz como un espectro de frecuencias, en el cual se pueda afirmar o denegar que cualquier fuente de luz puede interactuar con la</p>

			<p>materia, junto con sus diferencias. Además de profundizar en los fenómenos alrededor de la interacción. Las preguntas que surgieron son las siguientes: ¿Qué le hace la luz a cada goma?</p> <p>¿Cómo se da la interacción?</p> <p>¿Cómo pueden justificar que la absorción de cada color es diferente</p> <p>¿Después de un tiempo se observan cambios en la goma?</p> <p>¿Qué papel o significado físico se deduce del color de las gomas?</p>
--	--	--	---

Tabla 4.1. Descripción del momento I de la propuesta de aula. **Fuente:** elaboración propia.

FASE II: Reconociendo la frecuencia y la energía en la radiación electromagnética en su caracterización.

Momento II: ¿El infrarrojo y el ultravioleta son ondas electromagnéticas?

Intención	Diálogo histórico – crítico	Desarrollo	Criterios de análisis y discusión
Caracterizar la luz desde la radiación térmica, identificando	Para finales del siglo XIX también se conocía que los cuerpos al ser calentados emiten una radiación que solo	1. Utilizar un prisma de vidrio, cuatro termómetros, rotulador permanente de tinta negra, tijeras,	Las preguntas que surgen son: ¿Por qué la temperatura es diferente para cada color?

la frecuencia y la energía como elementos de explicación.	depende de la temperatura, es decir entre más calientes, irradian con mayor energía y su espectro se desplaza hacia frecuencias más altas, sin embargo, ninguna teoría física podía predecir que sucedía con el espectro cuando se variaba la temperatura.	cinta adhesiva, una caja de cartón y una hoja blanca para evidenciar propiedades de la luz asociadas a la radiación térmica y su espectro. 2. Durante cinco minutos registrar la temperatura cada minuto.	¿Por qué el termómetro fuera de los colores registra un cambio en la temperatura? ¿Qué relación se puede establecer entre la radiación y la temperatura? ¿Cómo caracterizar la luz desde su espectro en función de la frecuencia y la energía?
---	--	---	--

Tabla 4.2 Descripción del momento II de la propuesta de aula. **Fuente:** elaboración propia.

FASE III: Interpretando la interacción de luz y un metal y la necesidad de pensar en lo cuántico.

Momento III: ¿Qué hace que la luz interactúe al incidir sobre un metal?

Intención	Diálogo histórico – crítico	Desarrollo	Criterios de análisis y discusión
<ul style="list-style-type: none"> Analizar la interacción de la luz con un metal. Identificar la luz como una onda electromagnética. Reconocer dificultades 	En 1887, Heinrich Hertz, reconoció un fenómeno en la interacción de la luz con luz ultravioleta, la cual producía una corriente. Desde la teoría ondulatoria clásica, no se podía explicar, debido a que, según esta teoría, cuanto más intensa es la luz, más	PARTE I 1. Construir un aparato de Hertz, para evidenciar la naturaleza electromagnética de la luz. Materiales: a) Piezoeléctrico de encendedor de estufas. b) Aluminio c) Palos de balso d) Dos tablas de 15 cm x 7cm	¿Qué hace que el led se enciende? ¿Todos los leds emiten luz de igual intensidad? Al interactuar luz blanca con el aluminio ¿Se observan cambios en la intensidad del led? Al interactuar luz ultravioleta con el aluminio ¿Se

<p>para explicar el fenómeno de absorción a nivel microscópico.</p>	<p>energía tendrán los electrones, pero no era lo que sucedía experimentalmente. Albert Einstein en 1905 resuelve el problema proponiendo que la energía asociada a la radiación electromagnética no se distribuye de manera continua, sino en un número finito de cuantos de energía indivisibles, utilizando el trabajo de Max Planck.</p>	<p>e) Leds f) Alambres g) Pegante 2. Poner en interacción luz ultravioleta con el metal y evidenciar cambios en la intensidad de los leds.</p>	<p>observan cambios en la intensidad del led? ¿A qué se deben? ¿La frecuencia y la energía hacen parte de las explicaciones?</p>
		<p>PARTE II 1. Construir un electroscopio, para evidenciar la interacción de la luz en su naturaleza y un metal. Materiales: a) Frasco de vidrio b) Alambre de cobre calibre 8 c) Papel aluminio. d) Pegante e) Peinilla y barra de vidrio f) Fuente de luz blanca. g) Fuente de luz ultravioleta 2. Cargar el papel aluminio por medio de la frotación por inducción de la peinilla o la barra de vidrio y luego radiar luz a la parte superior del electroscopio con luz blanca y después con luz ultravioleta y evidenciar los cambios para dar cuenta de la organización de explicaciones.</p>	<p>¿Qué tipo de interacción ocurre entre la luz ultravioleta a diferencia de la blanca con el metal? ¿A qué se deben los cambios? ¿De qué depende la interacción? ¿Se puede afirmar que con todos los metales ocurra lo mismo? ¿Qué características se le asocia a la luz para que ocurra la interacción? ¿Qué sucede con la luz que interactúa con el metal? ¿Qué le hace la luz al metal?</p>

Tabla 4.3 Descripción del momento III de la propuesta de aula. **Fuente:** elaboración propia.

FASE IV: Acudiendo al comportamiento dual de la luz en la interacción con la materia

Momento IV: Ampliación de la experiencia desde la naturaleza dual de la luz

Intención	Diálogo histórico – crítico	Actividades	Criterios de análisis y discusión
<ul style="list-style-type: none"> • Analizar el comportamiento dual de la luz. • Construir explicaciones en la necesidad de acudir a la naturaleza cuántica de la luz en su interacción con la materia. • Retomar ideas de las construcciones que se han hecho alrededor de la luz en las actividades anteriores, para dar cuenta las propiedades ondulatorias de la luz (longitud de onda y frecuencia). 	<p>En 1909 en dos artículos científicos, Albert Einstein proponía que la luz tenía un comportamiento dual, por un lado, se comportaba como una onda y por otro lado también se comportaba como cuantos de luz, según el escenario en el que se trabajara. Además, en 1923, Arthur Compton reforzaba la idea de cuantos de luz al comprobar experimentalmente que a la luz se le asocia momento lineal. Todos estos resultados sirvieron de base a Louis De Broglie para caracterizar no solamente la luz en su comportamiento dual, sino la materia en general y da cuenta de la interacción de la luz con la materia.</p>	<p>PARTE I</p> <p>1. Con ayuda de láminas polarizadoras evidenciar la naturaleza electromagnética de la luz en su comportamiento de interacción. Materiales: a) Láminas polarizadoras o lentes de gafas 3D b) Fuente de luz blanca, ultravioleta y laser. c) Papel celofán.</p> <p>2. Poner en interacción las fuentes de luz por separado con la configuración de polarizadores (uno estático y otro de analizador, el cual girará) y papel celofán de diferentes colores.</p> <p>PARTE II</p> <p>1. Construir una rendija doble para con ayuda de fuentes de luz se acuda a caracterizar y deducir explicaciones del comportamiento dual de la luz. Materiales: a) Un laser</p>	<p>¿Cómo es posible considerar la luz como un cuanto (partícula), cuando se sabe que su comportamiento obedece a una onda? ¿Cuándo se utiliza el comportamiento corpuscular y cuándo el ondulatorio? ¿Se complementan o su comportamiento es simultáneo? ¿Qué explicación se le daría a la frecuencia y la longitud de onda de una partícula (cuanto de luz)? ¿Cuál de estas dos últimas variables físicas determinan la energía y la cantidad de movimiento? ¿Por qué al poner las láminas polarizadoras perpendicularmente, no atraviesa la luz? ¿Qué ocurre en ese momento de interacción?</p>

		<p>b) Una hoja transparente de acetato grueso tamaño carta</p> <p>c) Tijeras</p> <p>d) Vinilo color negro</p> <p>d) Un pincel</p> <p>e) Un alfiler</p> <p>g) Clicks de hojas</p> <p>h) Un metro</p> <p>2. Poner en interacción la rendija con diferentes fuentes de luz, por separado y observar en la pantalla (pared blanca) el comportamiento de luz en su interacción, para deducir iones desde la caracterización de la luz que se ha hecho en las anteriores actividades.</p>	<p>¿Cambia en algo al poner papel celofán de diferentes colores? ¿Por qué?</p> <p>Antes de realizar la observación, ¿Qué espera observar? ¿Por qué?</p> <p>¿El papel del observador afecta el comportamiento de luz?</p> <p>Al realizar las observaciones a diferentes distancias, ya sea acercando la rendija a la pared o al láser ¿qué se puede concluir?</p> <p>¿Por qué si solo hay dos rendijas, se ven más de dos puntos en la pared?</p> <p>¿Hay alguna variación en la intensidad de luz en cada uno de los casos?</p>
--	--	---	---

Tabla 4.4 Descripción del momento IV de la propuesta de aula. **Fuente:** elaboración propia.

4.2 Implementación de la propuesta de aula

La construcción de la base fenomenológica se consolida bajo unas acciones encaminadas primero a una propuesta experimental y segundo a una formulación conceptual que dan lugar a una organización del fenómeno de interacción de la luz con la materia y que

fue presentada como introducción a la mecánica cuántica en grado undécimo del Colegio Parroquial Confraternidad de la Doctrina Cristiana, ubicado en la localidad de Puente Aranda en la ciudad de Bogotá.

Esta propuesta de construcción de la base fenomenológica se basó en el desarrollo de las actividades experimentales, para las cuales se contó con tres horas de clase semanales de 40 minutos, teniendo en cuenta el contingente de la pandemia y en la cual el colegio manejó la modalidad de presencialidad bajo los protocolos de bioseguridad. Para cada sesión de 36 estudiantes, en promedio asistieron presencial 22 estudiantes y el resto se conectaba de manera virtual lo cual requirió del uso de videos y complementar los espacios del diseño de los montajes y la realización de las actividades. Dos horas de clase fueron dedicadas a la construcción de los montajes y desarrollo de la actividad experimental, la otra hora de clase a los espacios de lectura, discusión, preguntas y construcción de explicaciones, así como de propuestas de otros montajes.

A continuación, se muestra el análisis de cada uno de los momentos desarrollados por los estudiantes de grado once en la implementación en el aula y las cuales se organizan y se hace seguimiento desde la bitácora (explicaciones, respuestas a preguntas, representaciones, nuevas organizaciones e interpretaciones) de cada estudiante, junto con los videos de las experiencias y de las explicaciones, preguntas espacios de discusión y reflexiones que se articulan con lecturas de textos adaptados de cada uno de los científicos que se preocuparon por la interacción de la radiación con la materia. Todas las evidencias se organizaron en el aula virtual del colegio y donde los estudiantes podían complementar sus explicaciones con nuevas entregas. Para organizar los registros de los estudiantes, se les asignó un número, de tal manera que permitiera evidenciar los procesos y las maneras de organizar el fenómeno,

las preguntas que le surgen y las dificultades para comprender, además de no condicionar ni mostrar los nombres de ellos. Las siete actividades experimentales (ver anexos) se presentan en cuatro momentos, las cuales se articulan y buscan organizar el fenómeno de interacción luz - materia.

4.2.1 Actividad I: La absorción de la luz y la frecuencia con luz natural

Como se mostró en la tabla I, la primera fase inició con un diálogo de contextualización por parte del docente presentando un fenómeno del cual surgen preguntas que llevan a realizar un montaje experimental con el uso de la lupa, las bombas y disponer de un lugar amplio y de sol para realizar la actividad experimental. Los registros recolectados de los estudiantes permiten primero identificar el reconocimiento del fenómeno de la interacción de la luz con la materia, en particular con la lupa, con las bombas, en segundo lugar, que esa interacción produce unos efectos en la bomba, tercero, diferenciar los efectos de la luz que ha pasado por la lupa con bombas de diferentes colores (frecuencias), y cuarto, identificar fenómenos asociados a la luz y que dan lugar a reconocer qué es la luz y por qué suceden los efectos, finalmente quedan preguntas que se articulan con la siguiente actividad en conocer si con cualquier tipo de fuente de luz ocurren los mismos efectos.

En la primera parte de la actividad, los estudiantes tomaron los tiempos en que se demoraban en reventar las bombas de diferentes colores y organizarlos, con el fin de identificar y organizar los efectos y evidenciar la dependencia del color de la bomba logrando determinar esta variable dentro de los resultados y asociándolos a la interacción de la luz emitida por el sol con cada una de las bombas. Luego, teniendo presente los resultados de los tiempos, se les pidió rotular cada una de las bombas con marcador negro en una región

circular de aproximadamente dos centímetros de diámetro y también registraron los tiempos, los resultados se enfocaron en saber por qué con el color negro reventaban más rápido en comparación con las mismas bombas sin resaltador para los colores oscuros.

A partir de los resultados registrados en los tiempos tanto con el punto negro y sin él, además de la observación realizado en cada uno de los grupos se propiciaron discusiones acerca de algunas preguntas enfocadas primero en saber por qué explotan los globos, lo cual permite comprender la interacción de la luz con la lupa – globo y facilita la organización de explicaciones desde la magnitud de frecuencia (color de la bomba). Los resultados se resumen en la tabla 5, en la cual se busca responder a la pregunta de ¿cómo es la interacción de la luz con la lupa – globo? Primero, estableciendo las relaciones de la luz con el fenómeno de absorción, la frecuencia, con la energía y otras; segundo se describe los registros de acuerdo con la relación establecido por los estudiantes.

<i>¿Cómo es la interacción de la luz natural con la lupa - globos?</i>		
RELACIÓN	DESCRIPCIÓN	REGISTROS DE LAS JUSTIFICACIONES
Luz – fenómeno de absorción	Los estudiantes asociaron su campo de efectos a la absorción de la luz en los globos, ya que a partir de la radiación electromagnética concentrada en la lupa se evidencia que la mayoría reconocieron que los globos explotaban primero	<ul style="list-style-type: none"> • Algunas bombas absorben y reflejan la luz, provocando que se exploten rápido. • Una parte se absorbe, otra se refleje y también se refracta. • La luz en la bomba negra explota más rápido, absorbe más luz, se calienta más rápido y se explota la bomba y en la blanca, la absorción de la luz es más demorada, ya que por ser un color claro se demora más en explotar. • Lo que sucede es que la luz absorbida a excepción del blanco, es que estos

	debido a esta interacción y segundo por el material de los globos absorbe parte de la luz que incide.	reflejan su color y absorbe el resto de componentes de la luz blanca.
Luz - frecuencia ¹³	Otro de las relaciones que establecieron los estudiantes dentro del campo de efectos es la influencia del color de los globos, debido a que no todos explotan en el mismo intervalo de tiempo y es parte de los fenómenos asociados a la luz en su interacción.	<ul style="list-style-type: none"> • El blanco solo refleja y no se revienta tan rápido como los otros colores. • El negro absorbe todos los colores y el blanco los refleja. • La bomba negra absorbe más luz por lo tanto es más calor por eso explota mucho más rápido que las de color claro.
Luz - energía ¹⁴	Otra de las asociaciones que los estudiantes le dieron prevalencia en la construcción de explicaciones fue la relación entre luz y energía. Unos estudiantes vincularon que la bomba explota porque la luz lleva	<ul style="list-style-type: none"> • Que la luz al emitir calor y verse concentrada en un solo punto el calor es mucho mayor logrando quemar el plástico y por ende haciendo explotar el globo. • El sol es una fuente de calor que puede derretir, quemar o explotar cualquier cosa, según la intensidad. • Lo que sucede es que la energía se concentra gracias a la lupa en un punto

¹³ Los estudiantes establecen correspondencias, teniendo en cuenta el espectro electromagnético en el rango de lo visible y asocian el color reflejado de la bomba con respecto al tiempo en que se demora en reventarse.

¹⁴ La energía asociada a la onda electromagnética, en este caso la luz es una radiación que, de acuerdo con la temperatura y la concentración de rayos con ayuda de la lupa, establecen la relación para organizar la explicación alrededor del efecto que permite que la luz al interactuar con el globo, explote.

	algo que hace que se caliente la región de interacción con el globo.	<p>fijo, la cual provoca que aumente la temperatura y los globos se revienten.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Los globos explotan gracias al calor de la luz solar que se transmite con más intensidad a través de la lupa. • El globo negro al ser oscuro absorbe más luz y esta provoca aumento de temperatura suficiente para que el globo explote.
Otras relaciones	Una cantidad menor de estudiantes fundamentaron sus explicaciones con la temperatura del ambiente, el tiempo en que se demoran en explotar, así como el grosor y tamaño de los globos, a la vez una interacción con las moléculas.	<ul style="list-style-type: none"> • Por los cambios de temperatura no siempre va a hacer el mismo sol, colores más oscuros más luz necesitan, por eso se estallan primero que los colores claros. • Si es más oscura se demora menos y si es más claro se demora un poco más. • Las moléculas del globo absorben la luz del sol y esto hace que su energía cinética aumente y provoque un aumento de su temperatura.

Tabla 4.5 Organización de los registros de la primera parte del momento I. **Fuente:** *Elaboración propia.*

De cada una de las respuestas de los estudiantes se puede inferir que existe la interacción, es decir que el globo explota a pesar de tener un color diferente, que la lupa juega un papel importante en la dirección y concentración de los rayos produciendo un aumento de intensidad, es decir el rayo antes de pasar por la lupa es diferente al que sale de la lupa para que explote el globo, que a la luz se le asocia calor y con esto la temperatura aumenta, que el material del que están fabricados los globos absorben luz, es decir hay una interacción.

También otra de las razones asociadas a la explosión de los globos es que no todos los globos estallan al mismo tiempo y luego el registro les permitió a ellos afirmar que la capacidad de absorción de cada globo dependía de su color (frecuencia), ya que la luz que interactúa después de haber pasado por el globo absorbe longitudes de onda diferentes al color reflejado, en concordancia con el espectro electromagnético y de acuerdo con esto la frecuencia de los colores más oscuros es mayor con respecto a los más claros, El negro es el que absorbe mayor cantidad de energía, por eso su energía cinética de los electrones asociados a los átomos que componen el material de los globos aumenta y provoca que la temperatura en el lugar donde se da la interacción de la luz con el globo aumente y algunos estudiantes percibieron este efecto y es claro que la capacidad de absorción es asociada con el color de las bombas, ya que la luz que incide al pasar por la lupa refleja el color del globo y las demás longitudes de onda las absorbe.

Los registros muestran que los tiempos son diferentes y ellos infieren que es debido a que a la luz proveniente del sol se le asocia energía y la energía absorbida depende del color de cada globo, unos absorben más energía, otros menos, el color negro absorbe más energía y los colores claros menos, por eso la diferencia, además que el material influye en la rapidez también con que explotan, construyendo otras explicaciones alrededor de otras variables. En general, hay una comprensión de que la interacción de la radiación electromagnética con los globos depende del color (reflejado y al cual con el visible del espectro electromagnético) de cada uno de ellos y esto permite que los estudiantes a establecer relaciones de orden y comparar los efectos que ocurren con respecto al color, ya que logran identificar los resultados de cada color y asociarlo con la energía de la radiación electromagnética.

En este primer análisis sobre el fenómeno de interacción de la luz con los globos aparecen elementos importantes alrededor de reconocer que la luz al pasar por la lupa y hacerla incidir sobre el globo (identifican una sombra o concentración de rayos en los globos), es decir, hay interacción y debido a esto es que el globo explota. Los estudiantes empiezan a organizar el fenómeno desde los efectos en la interacción de la luz natural con globos de diferente color, favoreciendo la caracterización de la luz, a partir de la frecuencia asociada al globo, con la cual los tiempos en que explotan los globos son diferentes y esto les facilita relacionar la frecuencia y la energía, ya que la energía absorbida por cada globo es diferente. Además, estas primeras aproximaciones, les proporciona explicaciones diferentes permitiendo dirigir el análisis bajo unos criterios relacionados con la interacción de la luz y su caracterización con los globos.

Es importante reconocer que la actividad experimental del primer momento permitió a los estudiantes interactuar con el fenómeno, es decir establecieron la unidad fenómeno – sujeto y les permitió identificar cualidades (el color, a la luz se le asocia energía, temperatura, la luz es una onda, en la organización y estructura conceptual previa), con las cuales ellos pudieron establecer relaciones y poder hacer inferencias de lo observado que dentro de la construcción de la base fenomenológica dirime la dicotomía entre experimento y teoría dinamizando el diálogo entre el estudiante y el fenómeno como lo afirma Malagón

La inferencia y la concatenación de inferencias son el mecanismo que permite la construcción de una idea, de un concepto, de la formalización y de la teorización.” “lo que se piensa depende de lo que se percibe,” . . . “lo percibido depende de los elementos organizativos con los que se cuenta para ver lo que vemos” . . . “lo que se percibe también depende de lo que se piensa, una relación dinámica entre la percepción, la representación y el habla. (2014, p. 97)

La organización lograda en la relación de los tiempos con los colores de cada bomba en términos de su interacción les facilitó a los estudiantes hacer una clasificación de los colores y hacer unas escalas según la cual se puede decir cual globo de color respectivo absorbe más o menos en términos de la interacción de la luz y la materia y proponer otros colores diferentes como unos más oscuros u otros más claros, con lo cual se concreta que la construcción del campo fenomenológico es el punto de llegada y no el punto de partida.

Esta actividad, permitió evidenciar que los estudiantes identificaron que al poner en interacción luz solar que ha pasado por la lupa con los globos ocurren unos efectos visibles para ellos como lo es que explotan, y algunos estudiantes dan cuenta de que la luz lleva algo que produce el efecto que puede ser energía, debido a que en los registros asociados a la relación luz – energía, los estudiantes consideran el sol como fuente energética y de acuerdo con esto, afirman que la luz transporta energía, la cual entra en interacción primero con la lupa, concentrando toda esta energía y luego con los globos. En relación con los tiempos en que explotan los globos, ellos asocian a que cada frecuencia (color del globo), la cantidad de energía absorbida y por eso son diferentes. También es importante tener en cuenta cómo es la interacción con otros materiales, con otras fuentes y es lo que busca la siguiente fase, si pueden reconocer los mismos efectos en otras interacciones y de qué depende vinculando nuevas condiciones que amplían los efectos relacionados con la frecuencia y la energía mediante los comportamientos producidos.

4.2.2 Actividad II: La absorción de la luz y la frecuencia con laser

A partir de la anterior actividad se empieza a identificar que cada color (frecuencia) tiene una capacidad de absorción diferente y que el color negro absorbe completamente la

luz que está incidiendo, llevando a pensar que primero la luz solar es una composición de cada uno de los colores y que, al interactuar con un objeto, este absorbe todos los colores excepto el color de la bomba. Además de la caracterización de la luz bajo la frecuencia, se puede afirmar que a esta se le asocia algo (energía) que permite que la bomba explote.

En esta segunda actividad los estudiantes buscaron ampliar su experiencia con la actividad experimental de la interacción de luz proveniente de una fuente monocromática (laser) con gomas, para lo cual dispusieron de tres láseres de frecuencias definidas (azul, verde y rojo) y gomas de colores (rojas, verdes, azules, amarillas) y semitransparentes, con el fin de caracterizar la luz en su interacción con gomas de diferentes colores para estudiar la capacidad de absorción y emisión de cada una de las gomas, tanto en interacción con luz de su misma frecuencia, como la interacción de las gomas con radiación de diferente frecuencia..

La intención de esta actividad estaba enfocada a que los estudiantes identificaran otros fenómenos asociados a la interacción de una fuente diferente al sol con otro material con el fin de establecer y ampliar sus explicaciones sobre las que ya habían reconocido en la actividad I, así como cuantificar las cualidades en cuanto mayor o menor es en comparación con cada una de las fuentes de luz y seguir en la búsqueda de la magnitud de la frecuencia y su relación con la energía, teniendo en cuenta la naturaleza de la luz y su interacción con la materia.

La luz interactúa con la materia de diferentes maneras. Las propiedades del material y las propiedades de la fuente de luz afectan y determinan el comportamiento de la luz al interactuar con la materia. Una importante propiedad asociada a la luz es su frecuencia.

La radiación solar está compuesta de diferentes frecuencias. Un tipo, es la luz visible, la cual es una composición de los colores del arcoíris. El color de un objeto se caracteriza por el color o colores que este absorbe y los que refleja. Cuando un rayo de luz incide sobre un objeto de color rojo, el objeto se percibe rojo, porque la superficie absorbe todas las frecuencias excepto el color rojo.

En la primera parte los estudiantes hicieron incidir luz monocromática con cada una de las gomas de diferentes colores para observar un campo de efectos, primero con las del mismo color de la fuente y segundo con diferentes colores donde lograron asociar fenómenos como reflexión, refracción, transmisión y absorción. Para la segunda parte se realizaron otras configuraciones con más gomas con el fin de comparar los efectos y construir una escala con respecto a los comportamientos de la luz en su interacción con las gomas. Los resultados de las inferencias que hacen los estudiantes, se muestran en la tabla 6, donde se busca responder a la pregunta *¿Cómo es la interacción de luz monocromática y las gomas?* Siguiendo con las mismas relaciones establecidas en la primera actividad y mostrando las descripciones, en función de los registros de los estudiantes.

<i>¿Cómo es la interacción de luz con frecuencia definida (laser) y las gomas?</i>		
RELACIÓN	DESCRIPCIÓN	REGISTROS DE LAS JUSTIFICACIONES
Luz – fenómeno de absorción	Al igual que con las bombas, la mayoría de estudiantes relacionan los efectos al fenómeno de absorción, porque la luz que incide sobre las	<ul style="list-style-type: none"> • Las gomas absorben la luz dependiendo del color de ellas. • Una parte se absorbe, otra se refleja y también se refracta. • No se percibe la misma absorción que con los globos y es más rápido. • Las gomas oscuras absorben más luz, a diferencia de las más claras.

	<p>gomas no es de la misma intensidad a la que sale y esto hace parte de la interacción.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Todas las gomas absorben luz. • La mayor parte de la luz se absorbe, luego una parte se refracta, otro menos se refleja y otra se transmite.
Luz - frecuencia	<p>Los estudiantes también interpretan que el color de las gomas influye en la interacción de la luz con cada fuente monocromática, ya que, para frecuencias iguales, las gomas brillan más indicando que están reflejando, refractando y transmitiendo la luz.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Colores del mismo color de la del láser interactúan de manera diferente a con los demás. • Los colores oscuros absorben más luz. • En colores similares al del láser, las gomas se ven más brillantes.
Luz - energía	<p>Otra de las asociaciones que hacen los estudiantes es la relación de la energía y la intensidad de la luz al interactuar con gomas de igual frecuencia a la fuente.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • El color de la goma tiende a ser más intenso conforme a su absorción. • La intensidad de la luz disminuye al atravesar más gomas. • La intensidad de la luz disminuye, porque la goma absorbe parcialmente o totalmente esta. • Colores similares hacen ver más brillante la goma, por ejemplo, laser rojo con gomas rojas y naranjas. • La luz al interactuar con varias gomas, disminuye su intensidad a medida que las atraviesa.
Otras relaciones	<p>Otra cantidad menor de estudiantes identificaron otras relaciones como otros fenómenos que surgen de la</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Parte de la luz se absorbe y la otra se refleja y emite. • La goma al ser de gelatina y ser más densa disminuye la interacción. • Las formas de las gomas influyen en la interacción de la luz del láser.

	interacción de la luz con las gomas, la densidad, tamaño, forma y los componentes de la goma.	<ul style="list-style-type: none"> • El ángulo en que incide la luz, hace que la intensidad cambie con la forma de la goma.
--	---	--

Tabla 4.6 Organización de los registros de la segunda parte del momento I. **Fuente:** *Elaboración propia.*

Continuando con el análisis de los registros, los estudiantes hacen énfasis en la interacción de la luz con las gomas, ya que identifican un campo de efectos, ya sea con una goma o varias, además de una relación directa de la luz monocromática del láser con gomas de color similar a diferencia de colores (frecuencias) distintos.

Es más evidente la relación entre la luz – absorción donde los estudiantes construyen sus explicaciones alrededor de cuáles gomas de un color en particular absorbe más luz, frente a colores más claros a diferencia de los oscuros. En cambio, la relación luz – energía es menos caracterizada por los estudiantes y solo la asocian a la intensidad de la luz que cambia al interactuar con gomas de diferentes colores, como cuando la luz atraviesa más de una goma con el mismo rayo, aquí el porcentaje disminuyó en comparación con el campo de efectos que lograron identificar con las bombas y la explicación de por qué explotaban. Además, se establece una relación con la actividad I. Aquí los estudiantes afirman que: *“En la actividad anterior, se usaba la luz para reventar las bombas, aquí vemos como la luz deja de llegar en cierto punto, cuando uno o más objetos atraviesan”* (Estudiante 1) *“La luz del láser no tiene la misma energía de la luz natural, por eso no se observan otros efectos en las gomas, como sucedía con los globos”* *“Mientras que en los colores claros, la mayor parte de la energía*

es reflejada y la temperatura está directamente relacionada cuando más oscura la goma, mayor será el calor que absorba” (Estudiante 2)

Estos estudiantes siguen asociando el campo de efectos al color del objeto con el que interactúan, sugiriendo que el campo de efectos se genera debido a que comparten la misma naturaleza, es decir, el rojo interactúa más con colores claros, a diferencia del verde y el azul con colores oscuros y por lo tanto se puede hacer una comparación de cuanto mayor o menor absorbe la luz que incide y poder establecer una escala para construir relaciones.

Las dos primeras actividades estuvieron enfocadas a identificar que la luz al incidir sobre un material interactúa y los efectos son diferentes, sin embargo, se logra reconocer el papel que se le va a asignando a la frecuencia (color) y cómo se van organizando explicaciones alrededor de la dependencia de la frecuencia con los efectos observados en los globos y en las gomas. Además de la relación entre la frecuencia y la energía, donde algunos estudiantes afirman que para colores claros la energía es menor en comparación con los colores oscuros, donde los efectos en relación con atravesar varias gomas, la intensidad disminuye.

En la interacción de la luz con la materia, la energía ha estado presente en la explicación a los efectos como fueron que algunos globos con un color característico explotara más rápido, como la disminución en la intensidad de la luz monocromática (láser) al atravesar varias gomas y la relación de la luz con la frecuencia, sin embargo en el experimento de las bombas se pensó en la luz como una unidad, sin embargo, la luz es una onda electromagnética que se caracteriza por su composición en una gama de frecuencias (no solo el visible). Por eso, en la siguiente actividad experimental, la intención es fortalecer la relación entre la frecuencia y la energía, es decir a cada frecuencia se le asocia una temperatura que permite seguir profundizando en el papel de la frecuencia y el campo de

efectos al reconocer el espectro electromagnético, además del visible, el infrarrojo y lograr cuantificar estas variables comparándolas, las cuales permiten construir primero otras relaciones, así como construir lenguajes y ampliar la experiencia.

4.2.3 Actividad III: Reconociendo frecuencia y energía en la radiación electromagnética.

En el segundo momento, la intención es caracterizar la luz desde la radiación térmica, identificando la frecuencia y la energía como elementos de explicación. Continuando la organización del fenómeno de interacción de la luz con la materia, en esta actividad experimental se estableció una relación entre la temperatura asociada tanto al visible, como del infrarrojo con las frecuencias a las cuales emite un cuerpo, además de evidenciar que, para el infrarrojo, nuestros ojos no detectan esta radiación electromagnética.

Para empezar, los estudiantes realizaron el montaje colocando una hoja blanca, en el fondo de una caja de cartón. El prisma en el borde superior de la caja, de modo que quede del lado del Sol. El interior de la caja debe quedar todo o casi todo en sombra, luego se giró el prisma cuidadosamente hasta que apareciera el espectro visible lo más amplio posible sobre la hoja situada en el fondo de la caja y junto con la disposición de los termómetros en cada uno de los rangos de frecuencia del visible y otro en la sombra (región del infrarrojo), se registró la temperatura cada minuto.

Aquí, los estudiantes, identificaron que, a pesar de no observar la luz infrarroja, si se le puede asociar un campo de efectos, en función de la temperatura que corresponde a la radiación emitida y es clara la distinción que hacen del comportamiento del infrarrojo, frente a la luz natural identificando diferencias.

→ La luz visible se nos presenta en forma de colores, mientras que la radiación infrarroja provoca la sensación de calor. La luz visible y radiación infrarroja son emitidas por la misma fuente, sin embargo, no tienen el mismo comportamiento. La radiación

Figura 4.1. Registro sobre la distinción del infrarrojo y la luz visible. **Fuente:** Estudiante 4

Además, la articulación de las actividades se logra en la preocupación continua del sujeto por dialogar con la naturaleza y organizar el fenómeno como lo menciona

se puede asociar con el experimento de los globos puesto que cada color tiene diversas absorciones lo que quiere decir que unos tienen mayor concentración de energía que otros colores, donde en el experimento de los globos el sol ayudaba a la luz generar un rayo de calor en el formaba una desigualdad en la distribución puesto que cada color absorbía de una distinta forma relacionado con lo expuesto sobre las combinaciones de los distintos colores del vidrio.

Figura 4.2. Registro sobre la relación de la radiación térmica y el experimento de los globos.

Fuente: Estudiante 6

Esto permitió que los estudiantes logaran organizar explicaciones, construir relaciones y nuevos lenguajes que organizan el fenómeno. Ahora, para continuar en la construcción de la base fenomenológica, se sigue indagando en la interacción con otros materiales como lo son los metales y percibir nuevos campos de efectos que logren afianzar la relación entre la frecuencia y la energía, estos relacionados con la absorción de la luz y cómo se transforma en su interacción, es decir la luz al incidir sobre un metal, a primera vista

no se observan efectos, pero si se piensa el fenómeno de absorción a nivel atómico, se generan otras experiencias que logren mostrar que la interacción si ocurre y además las explicaciones adquieren limitaciones frente a teorías clásicas.

4.2.4 Actividad IV: La transformación de la luz en la interacción de la luz y un metal

En este tercer momento se busca analizar la interacción de la luz con un metal, primero identificando la luz como una onda electromagnética, con lo cual se reconocen dificultades para explicar el fenómeno de absorción a nivel microscópico. Para esto, se dispuso de dos actividades experimentales, en primer lugar, la asociada a la transformación de la luz ultravioleta al interactuar con aluminio en un oscilador de Hertz y en segundo lugar se construyó un electroscoipo para profundizar en la caracterización asociada a la radiación electromagnética que posibilita la interacción con el aluminio, el cual posee una naturaleza eléctrica y por lo tanto son la base para que ocurran cambios eléctricos.

En la primera parte se construyó el oscilador de Hertz similar al mostrado en la figura 2.1 y en vez del electrómetro se dispuso de un led, el cual estaba conectado a dos antenas receptoras que recibirían la señal electromagnética, pero a la fuente donde se producía la chispa, la cual tenía dos antenas emisoras con papel aluminio se hacía incidir luz ultravioleta sobre este para, primero comprobar la emisión de una radiación electromagnética que permitía que el led encendiera a través de la generación de una chispa, debido a la descarga de un piezoeléctrico que ioniza el aire y segundo, si la chispa es radiación electromagnética entonces posee una naturaleza eléctrica que al hacer incidir luz ultravioleta sobre el papel aluminio, interviene en la interacción de la luz con el metal, produciendo una chispa más brillante y por ende, que el led encendiera con más intensidad indicando una corriente mayor.

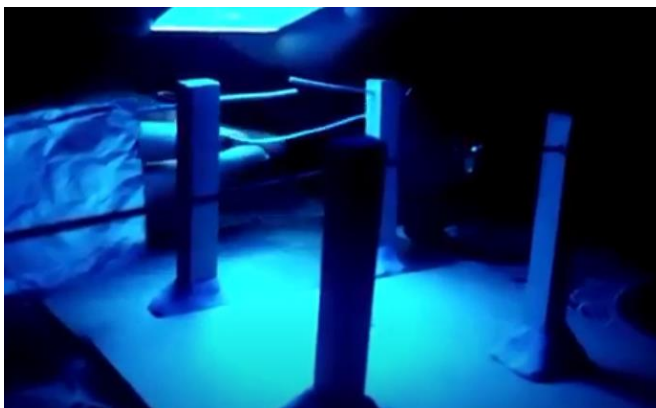


Figura 4.3. Montaje experimental del oscilador de Hertz. **Fuente:** Estudiante 2.

A raíz de la actividad experimental se proponen unas preguntas que ponen en diálogo lo observado, en la organización del fenómeno y construcción de explicaciones sobre la interacción de luz ultravioleta con el aluminio y se muestran en la tabla 4.7.

<i>¿Qué hace que la luz interactúe al incidir sobre un metal en el oscilador de Hertz?</i>		
RELACIÓN	DESCRIPCIÓN	REGISTROS DE LAS JUSTIFICACIONES
La chispa y la absorción de la luz en el metal	La mayoría de los estudiantes construyeron sus explicaciones alrededor del efecto que produce la chispa y cómo la luz que incide en el metal se transforma para generar una corriente mayor, de acuerdo con su capacidad de absorción.	<ul style="list-style-type: none"> • Los metales absorben y conducen electricidad, por lo cual estos pueden interactuar más fácil con la luz. • La chispa genera corriente eléctrica y le proporciona suficiente energía para encender el led
La intensidad de luz en el led	Otra de las asociaciones que hacen los estudiantes es la relacionada con la	<ul style="list-style-type: none"> • El brillo depende de la cantidad de energía que recibe. • El brillo del led llega a cambiar puesto que la luz ultravioleta, ayuda a que algo salga del metal y cuenta con más energía.

	intensidad en el led, ya que con luz natural no evidenciaron cambio, pero con la luz ultravioleta sí.	
La frecuencia	El cambio de luz natural al incidir sobre el aluminio por luz ultravioleta, plantea la relación de la frecuencia con la energía de la onda electromagnética generada en el oscilador	<ul style="list-style-type: none"> • Con luz blanca no se observan cambios ni en la chispa, ni en la intensidad del led. Mientras que, con luz ultravioleta, el brillo aumenta, tanto en la chispa, como en el led. • Si se aumentará la frecuencia, el brillo del led aumentará, porque le llega más luz y por ende más energía. • Al realizar el experimento fue notable que el led azul, transparente y rojo si se encendían, siendo el transparente el que brillaba con más intensidad, en cambio con los leds de color amarillo y verde no ocurrieron cambios.
Otras relaciones	Alguno estudiantes organizan el fenómeno desde la interacción de la luz con la materia, bajo la transformación de la luz y asociada a esta la de la energía.	<ul style="list-style-type: none"> • El metal es un material que permite que la luz se transforme y su energía también. • Las ondas son las encargadas de llevar corriente al led, dando como resultado un titileo, es decir nos da una señal de que está recibiendo energía.

Tabla 4.7 Organización de los registros de la primera parte del momento III. **Fuente:**

Elaboración propia.

El campo de efectos observado a través de los cambios fotovoltaicos lleva a mostrar que los estudiantes, asocian el cambio en el brillo del led a la separación de electrones del metal (aluminio) que generan una corriente y solo ocurre cuando se iluminan los electrodos,

cuando se hace incidir luz ultravioleta y finalmente también cuando se incide luz sobre el electrodo negativo.

Una de las preocupaciones que ha estado presente en la organización de explicaciones desde la actividad I, es la de evidenciar un campo de efectos, debido a la absorción de la luz, la cual no ocurre de manera similar a la que se observó en la bomba, en la goma, en la radiación emitida, sino que plantea escenarios de preguntas y problemas por comprender como es que la luz interactúa con la materia, de la cual los estudiantes han venido estructurando y estableciendo relaciones entre la frecuencia y la energía, en la absorción de la luz ultravioleta.

La intensidad de la luz. Continuando en esa dirección, la siguiente actividad experimental va a mostrar que la naturaleza electromagnética de la luz es la que facilita la interacción con la materia de naturaleza eléctrica, sin embargo, la base teórica ondulatoria de Maxwell no es la adecuada para explicar lo que sucede a nivel experimental.

4.2.5 Actividad V: La interacción de la luz y un metal: el electroscopio

En la segunda parte del momento III, se construyó un electroscopio, el cual sería cargado y se le incidía luz ultravioleta. Los estudiantes observaron cómo la interacción entre dos cuerpos de naturaleza similar (eléctrica) generaba la descarga del electroscopio. Aquí, al igual que en las actividades anteriores se organizaron los registros en la tabla 4.8, mostrando las relaciones que se construyen y cómo estas van generando procesos de formalización frente a la organización del fenómeno de interacción de la luz con la materia.

<i>¿Qué hace que la luz interactúe al incidir sobre un metal en el electroscopio?</i>		
RELACIÓN	DESCRIPCIÓN	REGISTROS DE LAS JUSTIFICACIONES

<p>La descarga y la absorción de la luz en el metal</p>	<p>La mayoría de los estudiantes construyeron sus explicaciones alrededor de la descarga y cómo la luz que incide en el metal se transforma de acuerdo con su capacidad de absorción.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La descarga ocurre porque al haber excesos de electrones en el aluminio estos interactúan a través de la lámina de zinc que es conductor también. • La descarga se produce porque solamente absorbe luz ultravioleta con luz natural no se observan cambios. • No todos los metales absorben la misma cantidad de luz.
<p>La intensidad de la luz</p>	<p>Otra de las asociaciones que hacen los estudiantes es la relacionada con la intensidad de la luz variando la distancia y además con luz natural no evidenciaron cambio, pero con la luz ultravioleta sí.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La luz ultravioleta hace que ocurra la descarga y variando la distancia los efectos son menores si se aleja. • Los efectos solo se observan con luz ultravioleta y dependiendo de su intensidad ocurre más rápido la descarga.
<p>La frecuencia</p>	<p>El cambio de luz natural al incidir sobre la lámina de zinc por luz ultravioleta, plantea la relación de la frecuencia con la energía de la onda electromagnética que incide sobre la placa</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La frecuencia indica un límite para que ocurra la interacción. • Si se aumentará la frecuencia, la descarga ocurre más rápido. • La frecuencia de la luz nos indica que para cualquier valor de onda asociada no ocurre el efecto de descarga.
<p>Otras relaciones</p>	<p>Alguno estudiantes organizan el fenómeno desde la interacción de la luz con la materia, bajo la transformación</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La descarga solo ocurre cuando se carga negativamente el electroscopio. Cuando se carga con la barra de vidrio no se observan cambios en las láminas de aluminio

	de la luz y asociada a esta la de la energía.	<ul style="list-style-type: none"> • La luz al ser una onda electromagnética interactúa con las cargas.
--	---	--

Tabla 4.8 Organización de los registros de la segunda parte del momento III. **Fuente:**

Elaboración propia.

Los estudiantes para comprender y organizar explicaciones de por qué se descarga el electroscopio solamente con luz ultravioleta, les generó nuevas preguntas, pero algunos han logrado explicar esta interacción a través de la naturaleza eléctrica que comparten y que con el exceso de carga que se encuentra en el sistema de metales le asignan un papel de que “sale del metal la carga” sin saber por qué ni la razón porque se emiten electrones. Sin embargo, la emisión de electrones, debido a la radiación incidente implica que la fuerza aplicada sobre los electrones es proporcional al campo eléctrico y por ende si este aumenta debido al aumento de la intensidad de la luz, la energía cinética de los electrones liberados también debe aumentar, pero Lenard¹⁵ en 1902 mostró que la energía cinética máxima con la que son emitidos los electrones es independiente de la intensidad de luz.

Einstein también se preocupó por comprender el fenómeno de interacción de la luz con la materia y en particular en el fenómeno de emisión y transformación de la luz, acudiendo de nuevo a la naturaleza corpuscular, lo que le facilitó pensar en la manera en que emiten y absorben los corpúsculos. Teniendo en cuenta la construcción de explicaciones alrededor del fenómeno de absorción, la naturaleza ondulatoria no es la correcta para explicar el fenómeno fotoeléctrico, ni la radiación del cuerpo negro. Así, los estudiantes han logrado

¹⁵ Lenard P. (1902) *Über die lichtelektrische wirkung*, *Annalen der Physik* 8, 149 – 198. Alemania.

y buscado otras maneras de dialogar con la naturaleza que los lleve a la organización del fenómeno de interacción de la luz con la materia. Por ende, las siguientes dos actividades experimentales servirán para organizar lo cuántico y cómo esta manera de relacionar del sujeto con la naturaleza amplía la experiencia de los estudiantes.

4.2.6 Actividad VI: El fenómeno de polarización desde lo cuántico

En este cuarto momento, los estudiantes han venido construyendo explicaciones sobre la interacción de la luz con la materia y la absorción de luz ultravioleta, lo cual hace que la luz se transforme y la energía asociada a la radiación electromagnética sea la que favorece la interacción de unos cuantos de luz que se caracterizan por la proporcionalidad entre la energía y la frecuencia. Por lo tanto, la intención se estructura en tres acciones:

- Analizar el comportamiento dual de la luz.
- Construir explicaciones en la necesidad de acudir a la naturaleza cuántica de la luz en su interacción con la materia.
- Retomar ideas de las construcciones que se han hecho alrededor de la luz en las actividades anteriores, para dar cuenta las propiedades ondulatorias de la luz (longitud de onda y frecuencia).

Teniendo esto presente se organizan dos actividades experimentales: una primera enfocada a comprender la polarización de la luz desde lo cuántico y finalmente se llega al experimento de la doble rendija, Aquí los estudiantes, ayudados de lentes de gafas 3D o polarizadores retirados de calculadoras dañadas, ponen en interacción luz monocromática (laser) con uno de los polarizadores, mientras el otro sirve de analizador, el cual girara mostrando cómo la luz atraviesa los polarizadores para ciertos ángulos y para otros no pasa. Las descripciones y registros se muestran en la tabla 4.9.

<i>Ampliación de la experiencia desde la naturaleza dual de la luz con los polarizadores</i>		
RELACIÓN	DESCRIPCIÓN	REGISTROS DE LAS JUSTIFICACIONES
El principio de superposición	Una de las asociaciones que hacen los estudiantes es en torno a caracterizar cada polarizador con una dirección particular para que la luz interactúe con ellos y al tener un sistema de dos polarizadores, el principio de superposición es clave en la organización de explicaciones.	<ul style="list-style-type: none"> • El uso de luz polarizada privilegia una dirección para atravesar el analizador y el polarizador. • La luz no pasa en su totalidad, depende del ángulo formado con el analizador con el polarizador
La observación	Otra de las asociaciones que hacen los estudiantes es la relacionada con la observación, ya que el acto de observar perturba el sistema.	<ul style="list-style-type: none"> • Se observa que no toda la luz pasa, ya que la intensidad es diferente. • La luz que pasa por el polarizador interactúa con el analizador cambiando su intensidad.
Otras relaciones	Algunos estudiantes organizan el fenómeno desde la interacción de la luz con la materia, bajo otros fenómenos como la absorción, la reflexión y la interferencia.	<ul style="list-style-type: none"> • Cuando la luz no atraviesa el material, esta es absorbida. • La interacción de la luz con los polarizadores es similar a la segunda actividad experimental, donde una parte de la luz se refracta y otra se refleja..

Tabla 4.9 Organización de los registros de la primera parte del momento IV. **Fuente:**

Elaboración propia.

Aquí los estudiantes, muestran que sigue prevaleciendo la facilidad de aplicar la naturaleza ondulatoria considerando la luz como una onda electromagnética que interactúa con los polarizadores, sin embargo, algunos intentan explicar el fenómeno de polarización desde la naturaleza corpuscular, es decir bajo la interpretación del fotón.

La intensidad está muy presente dentro de las explicaciones de los estudiantes, donde ellos primero, interpretan que la luz al interactuar con los polarizadores cambia y estos objetos obligan a la luz a comportarse de esa manera, algunos analizaron la luz antes de llegar a los polarizadores y después, indicando que la interacción es clave para ellos en el proceso de construcción de explicaciones porque intentan reconocer efectos que no son posibles sin la intención del sujeto por comprender y organizar el fenómeno; segundo el cambio de intensidad al interactuar lo asocian al igual que en el experimento de las gomas con el fenómeno de absorción, pero empiezan a identificar que no es igual al de las gomas, donde la luz se absorbe diferente, como se evidencia en el siguiente registro

manera que sea totalmente oscuro y negro haciendo que la luz del laser no se vea, además el rayo laser no pasa al estar un lente vertical y el otro horizontal. Por otro lado, al cambiar el ángulo de la dirección de un lente, pasa el laser y disminuye la intensidad de la luz roja del laser, en otro caso diferente ángulo se ve un punto más pequeño y con menor intensidad ya que para el ojo humano se ve muy cerca los lentes causando que se alcance a ver colores, pero cuando se utiliza un solo lente no causa ningún color distinto.

Figura 4.4. Registro sobre la relación de intensidad con la orientación del polarizador.

Fuente: Estudiante 6

El ángulo entre el polarizador y el analizador, les sugiere a ellos que la radiación electromagnética al ser polarizada, queda orientada vertical u horizontal, ya que con una logran observar que la luz es totalmente absorbida y por otro lado la interacción es solo de paso y no de absorción. Sin embargo, al combinar estos dos estados de la luz, asocian sus explicaciones con la intensidad variando el ángulo entre 0° y 90° , pasando de que el analizador absorba toda la radiación hasta ver completamente la misma intensidad antes y después del analizador.

Habiendo interpretado el comportamiento de la luz al interactuar con los polarizadores, ahora se propone indagar acerca de la interacción de la luz con una rendija y profundizar en el campo de efectos y sus relaciones que se pueden seguir construyendo como el principio de superposición de la luz al interactuar con la rendija y cuál es comportamiento antes y después.

4.2.7 Actividad VII: El experimento de la doble rendija y la introducción a la mecánica cuántica

El experimento de la doble rendija fue retomado por Richard Feynman, quien de manera novedosa enseñó una introducción a la mecánica cuántica, considerando el experimento para electrones y otras partículas. En esta segunda parte del momento IV, se sigue organizando el fenómeno de interacción de la luz con la materia y cómo antes de pasar la luz por la rendija, no se sabe por dónde va a pasar y además presupone que los cuantos pasan enteros. Para esta actividad se dispuso de una rendija casera construida con vinilo negro sobre acetato y una aguja. Con este montaje, se hizo incidir luz monocromática sobre la rendija.

<i>Ampliación de la experiencia desde la naturaleza dual de la luz con la doble rendija</i>		
RELACIÓN	DESCRIPCIÓN	REGISTROS DE LAS JUSTIFICACIONES
El principio de superposición	La relación que establecen es que antes de pasar la luz por las rendijas, hay una probabilidad de pasar por alguna.	<ul style="list-style-type: none"> • La luz puede pasar por las dos rendijas. • Antes de pasar se encuentran los fotones en una superposición
La observación	La observación cuántica requiere de nuevas maneras de relacionarse el sujeto con la naturaleza.	<ul style="list-style-type: none"> • La luz se comporta de manera diferente, porque solo hay dos rendijas y se observan más puntos en la pared. • La distancia hace que la observación cambie y no se logre ver bien.
Otras relaciones	Algunos estudiantes afirman que aparecen más de dos puntos en la	<ul style="list-style-type: none"> • Las dos naturalezas son válidas en algunos fenómenos de la luz, sin embargo, la interferencia de luz es diferente.

	pantalla y que la luz interactúa	<ul style="list-style-type: none"> • No se sabe por dónde atraviesan los fotones, pero si la probabilidad de pasar por alguna rendija. • Dependiendo de cómo se oriente la doble rendija, esta se orienta contrario a esta.
--	----------------------------------	---

Tabla 4.10 Organización de los registros de la segunda parte del momento IV. **Fuente:**

Elaboración propia.

La organización del fenómeno de interacción de la materia con la luz y sus formalizaciones logradas por los estudiantes dan cuenta de la consideración del comportamiento corpuscular en la explicación del fenómeno de polarización de la luz, como el experimento de la doble rendija, donde ellos reconocen que la observación perturba el sistema y los obliga a pensar de manera diferente en la organización de explicaciones, sin embargo no logran justificar el por qué sucede esto, indicando que algunas asimilaciones se hacen, no desde el experimento, sino acudiendo a fuentes de información (internet, libros), las cuales no le posibilita al estudiante, argumentar ni tener una base sólida que amplíe esa experiencia.. Allí, es evidente que la luz antes de pasar las rendijas se encuentra en un estado de superposición y cuando ya es observado colapsa y lo obliga a comportarse de una manera, es en ese momento que el acto de medir condiciona las otras medidas que se quieren hacer sobre el sistema.

Los estudiantes también intentan comprender la caracterización de la luz con lo que se observa en la pared, ya que ellos intentan explicar cómo es que la luz al pasar por dos rendijas se transforma en su comportamiento y desde el punto de vista ondulatorio las rendijas se convierten en nuevas fuentes permitiendo un patrón de interferencia, pero si se acude a lo corpuscular, empiezan a surgir dificultades, porque como ellos afirman en las

discusiones no entienden cómo aparecen más de dos franjas brillantes, a la vez si la luz son corpúsculos, estos pueden pasar por las dos rendijas y esto hace que la experiencia de aproximación frente al fenómeno cambie, porque implica saber cómo es que interactúa la luz con las rendijas y si el acto de observar lleva a que la luz se comporte de esta manera. Además, el campo de efectos que surge en cada una de las actividades no es algo casual, sino que se construye bajo la intencionalidad de los estudiantes para poder establecer relaciones y organizar el fenómeno.

4.3 Reflexiones y consideraciones finales de la construcción de la base fenomenológica

A partir de la construcción de la base fenomenológica sobre el fenómeno de interacción de la luz con la materia por medio de actividades experimentales estructuradas, organizadas y con una intención se logra reconocer que la luz interactúa con la materia, como se observó en el experimento con los globos, las gomas, los metales en el oscilador de Hertz y en el electroscopio generando un campo de efectos.

La frecuencia como primera cualidad identificada, permite establecer relaciones con los tiempos, la temperatura y a la vez con la energía. Estas aproximaciones son un primer paso en indagar a nivel microscópico qué sucede con la luz que interactúa con la materia y es allí donde algunos estudiantes identificaron que para que se originaron los efectos observados, era porque, tanto la materia como la luz comparten propiedades eléctricas, las cuales facilitan la interacción y esta conclusión de los primeros tres momentos fue clave al abordar el momento cuatro, ya que es un primer paso en comprender y acercarse a lo cuántico, porque los cambios eléctricos no se pueden explicar bajo la teoría clásica de las ondas electromagnéticas de Maxwell y por lo tanto esto le sugirió a los estudiantes un primer paso

en la reconciliación del comportamiento corpuscular y ondulatorio de la luz, como lo había planteado De Broglie, asociando a cada estado de translación del fotón (cuanto de luz) una función de onda y esta nueva explicación no se puede hacer desde la mecánica clásica, ya que es imposible pensar en la interacción de partículas y ondas clásicas, es decir que el cuanto de luz interactúa con su onda asociada, la cual solo se fundamenta en la consideración estadística y la probabilidad de encontrar un fotón al hacer una observación en algún lugar. Esta interpretación también implica tener en cuenta un factor de proporcionalidad frente a la observación, debido a que la frecuencia de la onda asociada al cuanto de luz es grande y este límite presenta dificultades y se necesitan de otras leyes como el principio de superposición.

Así en el experimento de la doble rendija no se puede predecir por cual rendija pasó, sino que la organización en la comprensión requiere de acudir al principio de superposición para decir con que probabilidad puede pasar por una de ellas, pero antes de intervenir el sistema, no se sabe por dónde va a pasar. La observación obliga al fotón a determinar su estado y esto hace que el diálogo intencionado entre el sujeto y el fenómeno sea considerado sobre una base conceptual diferente.

La actividad experimental se hace parte estructurante, organizada e intencionada, donde los estudiantes comprendieron la intención de cada de las actividades y a través de ellas el fenómeno de absorción de la luz generó más preguntas, de las cuales fueron surgiendo otras actividades que les permitieron organizar el fenómeno y construir procesos de formalización en base a las relaciones entre frecuencia, energía y la transformación de la luz.

Como elemento final dentro del trabajo de investigación, la construcción de la base fenomenológica facilitó el desarrollo de cada una de las actividades y la articulación para

comprender el fenómeno de interacción luz – materia, sin embargo, dentro de la organización del fenómeno, como las explicaciones y procesos de formalización se debe seguir profundizando, ya que los estudiantes quedaron con más preguntas y esto indica que la relación sujeto – fenómeno no termina con estas actividades, sino que son una primera aproximación a pensar en lo cuántico.

Conclusiones

La construcción de conocimiento debe ser un problema continuo de cada docente, ya que primero le plantea retos al profesor en relación a no llevar información al aula, sino reconocer la experiencia de cada estudiante y a partir de allí, formular espacios donde los niños y niñas aprendan ciencias, los cuales no deben limitar al estudiante a conocer y comprender el mundo, considerando las estrategias de conocimiento.

En ese sentido, el conocimiento, debe alejarse del edificio acumulativo, lineal y no problemático, ya que el acercamiento a este, se hace poniendo en juego nuevas teorías y leyes que no se acomodan con los conocimientos científicos preestablecidos y requieren nuevas formas de pensar, de comprender y dialogar con el mundo vinculando un lenguaje diferente que hacen que el docente busque otras estrategias y vuelva sobre el conocimiento científico para reconocer las dificultades con respecto a otras miradas para dialogar con el mundo.

Esto implica, que el surgimiento de nuevo conocimiento científico, no se considere un fracaso, ni tampoco de quitar y poner otros.

Desde esta perspectiva, el surgimiento de la mecánica cuántica implicó nuevas maneras de conocer, ya que en la relación de la interacción de la luz y la materia, los resultados experimentales no se podían explicar con los conocimientos clásicos de la luz, es

decir, en los fenómenos de absorción y emisión de la luz, la teoría ondulatoria de Maxwell, se asumía como un fenómeno continuo, lo cual aterrizado en la radiación del cuerpo negro llevaba a que la radiación electromagnética fuera infinita para frecuencias bajas.

Reconocer que los cambios y maneras en enseñar la mecánica cuántica, va mucho más allá del conocimiento científico alrededor de los fenómenos de absorción y emisión de la luz para los científicos de finales del siglo XIX y principios del siglo XX y más aún si se quieren llevar al aula de ciencias. Este desarrollo científico supuso nuevas maneras de relacionarse con el mundo, así como reflexionar y analizar los profundos cambios con respecto a la mecánica clásica y sus implicaciones filosóficas.

Uno de los cambios drásticos que supuso la mecánica cuántica fue el hecho de medir, porque la única posibilidad que tenemos de conocer el universo cuántico es haciendo mediciones acerca de sus fenómenos y comportamientos, pero estos a su vez alteran la historia. Es decir, desde Boltzmann, ya se había introducido en la teoría cinética de los gases el pensamiento aleatorio, probabilístico y estadístico, pero con la mecánica cuántica, empieza a ser fundamental para dialogar con el mundo de posibilidades y fue incluso Einstein, uno de sus férreos adversarios de esa consideración de la mecánica cuántica como teoría probabilística, como lo decía en su famosa frase “Dios no juega a los dados”, a pesar de introducir el cuanto de luz en las explicaciones del efecto fotoeléctrico ampliando la naturaleza de la luz en el fenómeno de interacción de la luz y la materia.

Así, la mecánica cuántica amplió la mirada de un mundo macroscópico al mundo microscópico y las interacciones de la luz con la materia, lo cual debe ser llevado al aula, no como teorías abstractas, sino desde una perspectiva fenomenológica junto con los estudios histórico - críticos que vincule un diálogo con los científicos de su momento y permita comprender los fenómenos y problemáticas que dieron origen al conocimiento de lo cuántico,

lo cual supone que el conocimiento no es absoluto, ni lineal (es decir no es una transición de lo clásico a lo cuántico), ni acumulativo, ni tampoco separado de la actividad científica de quienes lo construyen e invitan al docente a repensar en las estrategias de conocimiento, en la problematización de este, en cómo los estudiantes aprenden ciencias y cómo no llevar solamente información, sino invitar y orientar a los estudiantes desde nuevos escenarios de aprendizaje con herramientas didácticas no tradicionales.

A su vez, se debe considerar que abordar un término, no puede entenderse por sí solo, sino que se debe plantear una perspectiva vinculante de las interrelaciones que se tienen con diferentes términos para poder construir las explicaciones a los fenómenos. En este sentido, las explicaciones científicas dan cuenta de una serie de categorías y términos condicionados por teorías establecidas en unos contextos determinados.

Por lo cual, es pertinente que como maestros no demos por sentado los contenidos que enseñamos en las instituciones educativas, como verdades científicas inmutables e incuestionables, dado que recaemos en el desconocimiento del desarrollo histórico y epistemológico que se ha logrado consolidar en las ciencias que hoy en día conocemos y la importancia de la actividad experimental que constituye la estructura de la construcción de la base fenomenológica en los procesos de formalización de explicaciones.

Este trabajo de investigación deja abierta muchas puertas, ya que la construcción de la base fenomenológica construida aquí, son la base para continuar en el estudio de fenomenologías alrededor no solo del efecto fotoeléctrico, donde sería interesante abordar el papel de los tubos de vacío, los trabajos de Elster y Geitel, los trabajos de Thomson y Lenard, como también los relacionados con la radiación del cuerpo negro y lograr construir una base fenomenológica alrededor de la comprensión de radiación que emiten los resonadores y cómo estos permiten formalizar el fenómeno. Además, la perspectiva fenomenológica en la

enseñanza de las ciencias favorece el uso de la actividad experimental y dirime la dicotomía entre experimento y teoría.

La ruta escogida como las reflexiones que suscitan el desarrollo de este trabajo, es un primer paso en el abordaje de los fenómenos a nivel cuántico, así como en la construcción de la base fenomenológica sobre el fenómeno de interacción luz – materia, lo cual permitió que los estudiantes construyeran un campo de efectos y a partir de allí poder identificar cualidades asociadas y lograr establecer relaciones entre ellas como lo son: luz – absorción, luz frecuencia, luz – energía, luz – principio de superposición, el papel de la observación, entre otras. La interacción luz – materia es puesta en un escenario de indagación por parte del sujeto en el deseo de conocer y explicar lo observado, lo cual no se logra con una primera aproximación, sino que esto catapulta a otras preguntas, actividades experimentales que dan cuenta del por qué interactúa la luz con la materia y una primera explicación es debido a que la luz y la materia comparten propiedades similares permitiendo su interacción. Este primer paso, sirvió para hacer más preguntas sobre el fenómeno de interacción de la luz con la materia, es decir, si interactúan, quiénes son los que interactúan y de qué manera, dejando otros posibles abordajes en la construcción de explicaciones para aproximarnos a lo cuántico y la reconciliación entre la naturaleza corpuscular y ondulatoria de la luz en su fenomenología. En consecuencia, este trabajo para el docente, sugiere nuevos abordajes para ser investigados y son base para continuar mejorando la enseñanza de las ciencias.

Bibliografía

- Akarsu B. (2010) *Einstein's redundant triumph "Quantum Physics": An extensive study of teaching / learning quantum mechanics in college*. Lat. Am. J. Phys. Educ. 3(2) 273 - 285
- Ayala, M. (1999) La enseñanza de la física para la formación de profesores de física, Tecne Episteme Y Didaxis, Fondo Editorial Universidad Pedagógica Nacional. Vol. 4, 6 – 13.
- Ayala M. M., Romero A., Malagón J. (2004) *De la mecánica newtoniana a la actividad de organizar los fenómenos mecánicos*. Física y Cultura pp. 65, 78. Bogotá. Colombia
- Ayala, M. M. (2006) *Los análisis histórico críticos y la recontextualización de saberes científicos*. Construyendo un nuevo espacio de posibilidades, Pro-Posições, Vol. 17.
- Ayala. M. M., Malagón. J. F. y Sandoval S. (2011) *Magnitudes, medición y fenomenologías*. Revista de Enseñanza de la Física. Vol. 24, Nº 1, 2011, pp. 43-54
- Caldeira, M. H. (2017). *Los libros de texto de ciencias: ¿son como deberían ser?* Tarbiya, Revista De Investigación E Innovación Educativa, (36). Recuperado a partir de <https://revistas.uam.es/tarbiya/article/view/7240>

- Cortés C. G. (2018) *Sobre la importancia de axiomatizar la mecánica newtoniana haciendo uso del formalismo matemático de Von Neumann para la enseñanza de la mecánica cuántica*. Departamento de física. Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá.
- Cuesta, Y. (2018). Estado del arte: tendencias en la enseñanza de la física cuántica entre 1986 y 2016. *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, 44, 147-166
- De Broglie L. (1925) *On the Theory of Quanta*. A translation of: RECHERCHES SUR LA THÉORIE DES QUANTA (Ann. de Phys., 10e série, t. III (Janvier-Février 1925)).
by: A. F. Kracklauer
- De Broglie, L. (1939) *Materia y luz*. Trad. Xavier Zubiri, Espasa-Calpe.
- De Broglie, L. (1957). *Continuidad y Discontinuidad en Física Moderna*. Madrid: Espasa-Calpe S.A.
- Dirac P. A. M. (1958) *The Principles of Quantum Mechanics*, (4a. Edición) Oxford University Press.
- Duhem, P. (1992) [1905]. *Analyse de l'ouvrage de Ernst Mach. La Mécanique. En P. Duhem, L'Évolution de la Mécanique* (pp. 443- 462). Paris: Librairie Philosophique J. Vrin.
- Halliday D., Resnick R. Walker J. (2014) *Fundamentals of physics*. Tenth Edition. Wiley. United Sates of America.
- Heelan P. (2016) *The Observable. Heisenberg's philosophy of quantum mechanics*. Edited with a foreword by Babette Babich; foreword by Michel Bitbol. Peter Lang Publishing, Inc., New York.
- Hernández R. (2016) *Metodología de la investigación*. Sexta edición. McGrawHill Education. México.
- Einstein A. (1905) *Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz*. Los sueños de los que está hecha la materia. Crítica.

- Fanaro, M. (2009). *La Enseñanza de la Mecánica Cuántica en la Escuela Media* (Tesis Doctoral).
- Fischler H. y Lichtfeldt M. (1992), *Modern physics and student's conceptions*. International Journal of Science education. 14 (2) pp. 181-190.
- Gil D. y Solbes J. (1993), *The introduction on modern physics: overcoming a deformed vision of science*. International Journal of Science education. 15 (3) pp. 255-260.
- Hallwachs W. (1988) *Über den Einfluss des Lichtes auf electrostatics geladene Körper* (Sobre la influencia de la luz en cuerpos cargados electrostáticamente) *Annalen der Physik* Volume 269 issue 2. Alemania.
- Hertz H. (1887). *Über einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die electriche Entladung* (Sobre la influencia de la luz ultravioleta en la descarga eléctrica), *Annalen der Physik* Volume 267 issue 8. Alemania.
- Huhges A. L. y DuBridge L. A (1932) *Photoelectric Phenomena*. McGraw Hill Company. New York and London.
- Malagón Sánchez, J. F. (2014). *Teoría y experimento, una relación dinámica: implicaciones en la enseñanza de la física*. *Revista Física y Cultura: Cuadernos sobre historia y enseñanza de las ciencias*, 8, 95-104.
- Malagón, J., Ayala, M., y Sandoval, S. (2011). *El experimento en el aula. Comprensión de fenomenologías y construcción de magnitudes*. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.
- Malagón. J. F., Sandoval S. y Ayala M. M. (2013) *La actividad experimental: Construcción de fenomenologías y procesos de formalización*. *Praxis Filosófica Nueva serie*, No. 36, enero-junio 2013: 119 - 138

- Newton I. (1675) *Opticks: Treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light*. London.
- Ostermann, F. y M. A. Moreira (2000). *Física contemporánea en la escuela secundaria: una experiencia en el aula involucrando la formación de profesores*. Enseñanza de las Ciencias, 18 (3), pp. 391-405.
- Planck, M. (1901). Sobre la ley de distribución de la energía en el espectro normal. Los sueños de los que está hecha la materia. Crítica.
- Planck, M. (1912). *The theory of heat radiation*. (M. Masius, Trad.)
- Sánchez J. M. (2005) Historia de la física cuántica. I. El periodo fundacional (1860 – 1926). Crítica. Barcelona. España.
- Sandoval, S., Ayala, M., Malagón. J., Garzón M., Tarazona L. (2018) *Una perspectiva fenomenológica para la enseñanza de las ciencias*. Bogotá. Universidad Pedagógica Nacional, CIUP.
- Sandoval, S., Ayala, M., Malagón. J. y Tarazona L. (2006) *El experimento en enseñanza de las ciencias como una forma de organizar y ampliar la experiencia*. Ponencia presentada en el III Congreso Nacional de Enseñanza de la Física. Colombia.
- Sinarcas, V. y Solbes, J. (2013) *Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la Física Cuántica en el bachillerato*, Enseñanza de las Ciencias 31 (3), pp. 9-2
- Sing Ch., Marshman E. (2010) Review of student difficulties in upper - level quantum mechanics, Physical Review Special Topics - Physics Education Research 11, 1 - 24.

ANEXOS

Actividades experimentales

Se desarrollaron siete actividades experimentales, las cuales se muestran a continuación.

	COLEGIO PARROQUIAL CONFRATERNIDAD DE LA DOCTRINA CRISTIANA Actividad I: La absorción de la luz natural en interacción con la materia 2021	
---	--	---

LA ABSORCIÓN DE LA LUZ Y LA FRECUENCIA CON LUZ NATURAL

La cuestión de la naturaleza de la luz es un tema central en la comprensión de la fenomenología alrededor de la interacción de la luz con la materia. Dentro de las maneras de interacción que se dan, están los fenómenos de reflexión, refracción y absorción de la luz, los cuales vinculan un análisis cuidadoso sobre su comportamiento que lleva a considerar la luz como una onda o como una partícula de acuerdo con el fenómeno estudiado.

En este primer acercamiento de la interacción de la luz con la materia se busca analizar la naturaleza de la luz en la comprensión y organización de explicaciones, construyendo la magnitud de frecuencia y su caracterización con respecto a los fenómenos observados.

Objetivos

- Identificar los fenómenos de reflexión, refracción y absorción de la luz y su interacción con un globo y gomas.
- Construir magnitudes (la frecuencia) asociadas a la absorción de la luz.

ACTIVIDAD I

¡EXPLOTA GLOBOS CON UNA LUPA!

Una lupa es un instrumento óptico compuesto por una lente que permite concentrar los rayos paralelos que inciden en un punto al atravesarla. Puedes aprovechar esta lente para concentrar los rayos solares y... ¡estallar globos!

Materiales

- a) Globos de diferentes colores (blanco, negro, rojo, verde, naranja, azul y amarillo)
- b) Lupa
- c) Luz solar
- d) Cronometro



PROCEDIMIENTO

1. Infla cada uno de los globos. Sácalos al aire libre y ponte de espaldas al sol. ¿Qué colores explotaran más rápido?
2. Coge una lupa, acércala a cada uno de los globos y ve alejándola hasta que los rayos solares formen un círculo lo más pequeño posible. De acuerdo con los resultados completar la siguiente tabla. De izquierda a derecha, clasifícalos en relación con el fenómeno que se está estudiando.

Color							
Tiempo(s)							

¿Todos explotaron o alguno solamente se perforo?

3. Ahora, pinta en el globo blanco un círculo con un rotulador negro e intenta explotarlo con la lupa. ¿Qué pasa ahora?

Análisis

Analizar los resultados obtenidos de la experimentación con base en las siguientes preguntas:

- I. ¿Por qué explotan los globos?
- II. ¿A qué se debe la diferencia en los tiempos de explosión del globo? ¿De qué depende?
- III. ¿La luz al llegar al globo se transforma o cómo es la interacción con cada globo?
- IV. ¿Por qué la bomba de color blanco explota muy rápido y la negra no?
- V. Con el docente realizar la siguiente lectura, subrayando las ideas importantes, escriba las inquietudes que le deja el texto y relaciónelas con sus explicaciones.

“Un cuerpo caliente emite rayos de calor. Los sentimos claramente cerca de una estufa caliente. La intensidad de los rayos de calor que un cuerpo caliente emite depende de la naturaleza y de la temperatura del cuerpo, pero es en general independiente de la naturaleza de los cuerpos sobre los que caen los rayos. Sentimos los rayos de calor solamente en los cuerpos muy calientes, pero todos los cuerpos los emiten, cualquiera que sea su temperatura, aunque su magnitud disminuye con la de esta. Un cuerpo pierde calor en proporción a lo que radia, y su temperatura debe disminuir salvo que esta pérdida sea compensada. Un cuerpo rodeado por sustancias que se encuentran a su misma temperatura no experimenta un cambio

de temperatura. En este caso, la pérdida de calor producida por su propia radiación es compensada exactamente por los rayos que emiten los cuerpos que le rodean, una parte de los cuales absorbe el cuerpo. La cantidad de calor que este cuerpo absorbe en un tiempo dado debe ser igual a la que emite en el mismo intervalo. Esto es válido cualquiera que sea la naturaleza del cuerpo; cuantos más rayos emita un cuerpo, más rayos incidentes debe absorber. La intensidad de los rayos que emite un cuerpo ha sido denominada su capacidad de radiación o emisión; y el número que denota la fracción de los rayos incidentes que se absorben, la capacidad de absorción. Cuanto mayor sea la capacidad de emisión de un cuerpo, mayor debe ser su capacidad de absorción. Una consideración más estrecha demuestra que la relación entre las capacidades de emisión y de absorción para una temperatura es la misma para todos los cuerpos.” (Kirchhoff, 1860). Tomado de Historia de la física cuántica, José Manuel Sánchez. Página 27.

Preguntas que surgen . . .

1. ¿Por qué un cuerpo emite radiación? ¿A qué se debe?
2. ¿Todos los cuerpos emiten de la misma manera?
3. ¿Qué relación se puede establecer entre la emisión y absorción de la luz?
4. ¿Qué significa que un cuerpo absorba radiación? ¿Cómo se establece la interacción entre el cuerpo que emite y el que absorbe?

	<p>COLEGIO PARROQUIAL CONFRATERNIDAD DE LA DOCTRINA CRISTIANA</p> <p>Actividad II: La absorción de la luz monocromática en interacción con la materia</p> <p>2021</p>	
---	--	---

LA ABSORCIÓN DE LA LUZ Y LA FRECUENCIA CON LASER

A partir de la anterior actividad se empieza a identificar que cada color (frecuencia) tiene una capacidad de absorción diferente y que el color negro absorbe completamente la luz que está incidiendo, llevando a pensar que primero la luz solar es una composición de cada uno de los colores y que, al interactuar con un objeto, solo absorbe el color de la bomba, reflejando el resto. Además de la caracterización de la luz bajo la frecuencia, se puede afirmar que a esta se le asocia algo (energía) que permite que la bomba explote.

En esta segunda parte, se cambia la fuente por una fuente monocromática (laser) y se caracterizará la luz en su interacción con gomas de diferentes colores para estudiar la capacidad de absorción y emisión de cada una de ellas. También se seguirá en la búsqueda de la magnitud de la frecuencia y su relación con la energía, teniendo en cuenta la naturaleza de la luz y su interacción con la materia.

ACTIVIDAD II

¿QUÉ LE SUCEDE A LA LUZ CON LAS GOMAS?

El láser es un dispositivo cuyo funcionamiento se basa en la amplificación de la luz por emisión estimulada, cuyas propiedades son:

- La luz es coherente, es decir, su fase no cambia.
- La luz es monocromática, es decir tiene un intervalo limitado de longitud de onda.

- Su ángulo de dispersión es mínimo.

Materiales

- Gomas de diferentes colores
- Laser

La luz interactúa con la materia de diferentes maneras. Las propiedades del material y las propiedades de la fuente de luz afectan y determinan el comportamiento de la luz al interactuar con la materia. Una importante propiedad asociada a la luz es su frecuencia.

La radiación solar está compuesta de diferentes frecuencias. Un tipo, es la luz visible, la cual es una composición de los colores del arcoíris. El color de un objeto se caracteriza por el color o colores que este absorbe y los que refleja. Cuando un rayo de luz incide sobre un objeto de color rojo, el objeto se percibe rojo, porque la superficie absorbe todas las frecuencias excepto el color rojo.

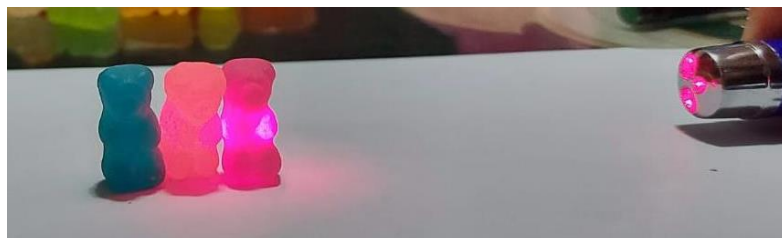
Procedimiento

- Haga incidir la luz del láser sobre gomas de diferente color y complete la siguiente tabla, registrando lo observado en cada goma al interactuar con la luz.



	Goma transparente	Goma de color rojo	Goma de color verde
Luz roja			
Luz verde			

2. Realice la configuración de tres gomas, primero del mismo color y luego con diferentes configuraciones de colores y registre lo que observa al interactuar luz con las gomas.



Configuración	Luz roja	Luz verde
Todas transparentes		
Todas rojas		
Todas verdes		

Análisis

Analizar los resultados obtenidos de la experimentación con base en las siguientes preguntas:

- I. ¿Cómo relaciona la actividad de los globos con esta? ¿Qué explicaciones se pueden hacer desde los resultados?
- II. ¿Qué le sucede a la luz al interactuar con las gomas?
- III. ¿Cómo explicar que la luz no sale de la goma completamente?
- IV. ¿Se diferencian cambios al hacer incidir luz de la misma frecuencia (color) con la de las gomas?

- V.** ¿Todas las gomas absorben de la misma manera luz del mismo color? ¿Cómo caracterizar esas diferencias?
- VI.** ¿Se pueden percibir efectos sensibles en las gomas al interactuar luz con las gomas?

	<p>COLEGIO PARROQUIAL CONFRATERNIDAD DE LA DOCTRINA CRISTIANA</p> <p>Actividad III: Reconociendo la frecuencia y la energía en la interacción de la luz con la materia</p> <p>2021</p>	
---	---	---

LA FRECUENCIA Y LA ENERGÍA EN LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La región infrarroja del espectro electromagnético fue descubierta por William Herschel en 1800 utilizando un prisma y unos termómetros. Para ello obtuvo el espectro visible, haciendo pasar la luz blanca del sol a través de un prisma y colocó varios termómetros, uno en la región del azul, otro en el rojo (ambos colores detectables por el ojo) y puso un tercer termómetro más allá del rojo, inmediatamente después. Con un cuarto termómetro midió la temperatura ambiente y descubrió que la temperatura que marcaba el termómetro en la zona “por debajo” del rojo (y de ahí su nombre “infra” rojo) era mayor que la del ambiente.

Objetivos

- Caracterizar la luz desde la radiación térmica.
- Identificar el espectro electromagnético

ACTIVIDAD III

LA RADIACIÓN TÉRMICA

Los cuerpos emiten radiación electromagnética en frecuencias que dependen de su temperatura. Por ejemplo, nuestro cuerpo y el de los animales emiten una radiación infrarroja que nuestros ojos no detectan, pero sí lo hacen otros aparatos, como los anteojos de visión nocturna, o los termómetros clínicos actuales, que permiten medir la temperatura corporal sin contacto.

Materiales

- a) Un prisma de vidrio
- b) Cuatro termómetros
- c) Rotulador permanente de tinta negra
- d) Tijeras
- e) Cinta adhesiva
- f) Una caja de cartón
- g) Una hoja blanca y de diferentes colores

PROCEDIMIENTO

Se coloca una hoja blanca, en el fondo de la caja de cartón. El prisma se coloca cuidadosamente en el borde superior de la caja, de modo que quede del lado del Sol. El interior de la caja debe quedar todo o casi todo en sombra (Figura). Se gira el prisma cuidadosamente hasta que aparezca un espectro visible lo más amplio posible sobre la hoja situada en el fondo de la caja.

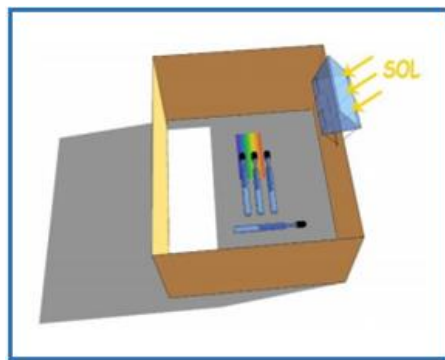


Figura 2. Experimento de Herschel. **Tomado de:** <http://sion.frm.utn.edu.ar/NOC-Argentina/wp-content/uploads/2018/12/Herschel-IAU100-ESP.pdf>

Los termómetros tardan unos cinco minutos en alcanzar sus medidas finales. Cada minuto registramos en la tabla de abajo, las temperaturas en cada una de las tres regiones del espectro y en el de ambiente. No hay que mover los termómetros de su posición en el espectro ni bloquear su luz.

Hoja Blanca	Termómetro en el azul	Termómetro en el amarillo	Termómetro más allá del rojo	Termómetro en la sombra
Después de 1 minuto				
Después de 2 minutos				
Después de 3 minutos				
Después de 3 minutos				
Después de 4 minutos				
Después de 5 minutos				

Análisis

Analizar los resultados obtenidos de la experimentación con base en las siguientes preguntas:

- I. ¿Cómo se da la interacción de la luz con las hojas de diferentes colores?
- II. ¿Por qué en principio se propone que la hoja debe ser blanca?
- III. ¿Se evidencian cambios de temperatura con cada una las hojas de diferentes colores con respecto a la blanca? ¿A qué se deben?
- IV. ¿Qué relación se le asigna a la temperatura con respecto a la frecuencia?
- V. ¿Existe relación entre la temperatura y la energía, entre la frecuencia y la energía asociada a la luz y su interacción con las hojas?

- VI. Realice la siguiente lectura, subrayando las ideas importantes, escriba las inquietudes que le deja el texto y relaciónelas con sus explicaciones.

PLANCK M. (1900) Sobre la ley de distribución de la energía en el espectro normal

“Las mediciones realizadas por O. Lummer E. Prinsheim en el Instituto Imperial Físico – Técnico con la finalidad de estudiar el espectro calorífico dirigieron mi atención al principio de Kirchhoff, según el cual en una cavidad delimitada por paredes totalmente reflectantes en la que se ha hecho el vacío y que contiene cuerpos emisores y absorbentes cualesquiera con el tiempo se origina un estado en el que todos los cuerpos poseen la misma temperatura y ninguna de las propiedades de la radiación – ni siquiera la distribución espectral de energía – depende de la constitución de aquellos, sino exclusivamente de la temperatura. La llamada distribución normal de la energía representaba algo absoluto . . . Como vía directa a la solución se insinuaba el empleo de la teoría electromagnética de la luz formulada por Maxwell. Me imagine, en concreto que la cavidad estaba llena de osciladores o resonadores lineales simples débilmente amortiguados con diferentes periodos propios, y supuse que el intercambio de energía entre los osciladores debido a la radiación emitida de unos y otros conduciría con el tiempo al estado estacionario de distribución normal de la energía predicha por Kirchhoff.”

- ❖ Haga una representación de la cavidad propuesta por Planck e identifique el comportamiento de la luz a su interior.
- ❖ Caracterizar la interacción de la luz al interior de la cavidad con los resonadores propuestos por Planck.
- ❖ ¿Qué dificultades en relación la experimentación se propuso solucionar Planck?

- ❖ ¿Qué suposiciones se planteó Planck?
- ❖ ¿Se puede identificar relaciones entre la frecuencia, la energía en la interacción de la luz y los resonadores?

	<p style="text-align: center;">COLEGIO PARROQUIAL CONFRATERNIDAD DE LA DOCTRINA CRISTIANA</p> <p style="text-align: center;">Actividad IV: La transformación de la luz en la interacción de la luz y un metal</p> <p style="text-align: center;">2021</p>	
---	--	---

LA TRANSFORMACIÓN DE LA LUZ EN LA INTERACCIÓN DE LA LUZ Y UN METAL

Objetivos

- Analizar la interacción de la luz con un metal.
- Identificar la luz como una onda electromagnética.

ACTIVIDAD IV

APARATO DE HERTZ

Materiales:

- a) Piezoeléctrico de encendedor de estufas.
- b) Aluminio
- c) Palos de balsa
- d) Dos tablas de 15 cm x 7cm
- e) Leds
- f) Alambres
- g) Pegante

2. Poner en interacción luz ultravioleta con el metal y evidenciar cambios en la intensidad de los leds.

PROCEDIMIENTO

1) Tomar dos bases de madera de 10 cm x 10 cm y sobre ellas colocar dos palos de balzo de 10 cm de alto y separados 10 cm, como se observa en la imagen

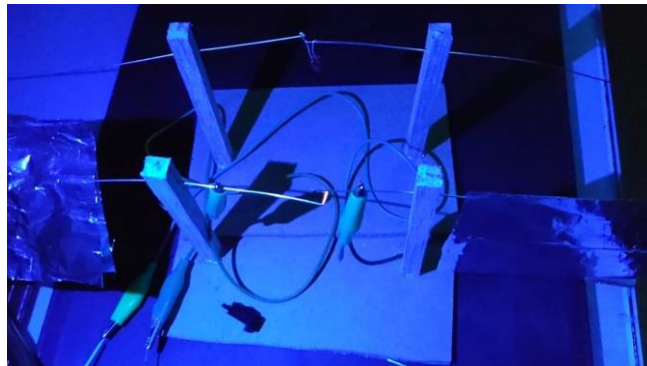


Figura 3. Oscilador de Hertz. Fuente: elaboración propia.

2) Abrir un hueco en cada uno de los palos de balzo a 1 cm de la parte superior, de tal manera que, por ellos, se pueda atravesar un alambre.

3) Introducir un alambre en cada orificio abierto en el anterior paso de aproximadamente 20 cm de largo.

4) Sobre una de las bases de madera unir conectar un led a cada alambre que esta introducido en cada palo de balzo.

5) Disponer de un encendedor de estufa y tomar solamente el piezoeléctrico y dejar los dos cables que salen de este y conectarlos a los alambres de la otra base.

6) Recortar dos pedazos de papel aluminio para ser colocados en los alambres que están conectados al led, como se observa en la imagen.

7) Hacer incidir luz blanca, sobre el papel aluminio y verificar si sucede algo en el brillo del led.

8) Realizar el mismo procedimiento con luz ultravioleta.

Análisis

Analizar los resultados obtenidos de la experimentación con base en las siguientes preguntas:

- ¿Qué produce la chispa? ¿Por qué?
- ¿El brillo del led cambia cuando se ilumina con luz blanca? ¿con luz ultravioleta?
- Si se produce un cambio en el brillo del led, ¿a qué se debe?
- ¿Cómo explicar el fenómeno de interacción de la luz con el metal?
- ¿Si se varía la frecuencia, el brillo del led cambia?
- Con el docente realizar la siguiente lectura, subrayando las ideas importantes, escriba las inquietudes que le deja el texto y relaciónelas con sus explicaciones.

EINSTEIN A. (1905) Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz

“Existe una diferencia formal y profunda entre los modelos que los físicos han creado sobre los gases y otros cuerpos ponderables y aquél de la teoría de Maxwell de los procesos electromagnéticos en el así llamado espacio vacío. Mientras que consideramos al estado de un cuerpo como determinado perfectamente por un número de átomos y electrones ciertamente muy grande, pero finito, nos servimos por otro lado de funciones espaciales continuas para la determinación de estados electromagnéticos de un espacio, de tal manera que un número finito de magnitudes no se considera como suficiente para una

interpretación íntegra del estado electromagnético de un espacio. Según la teoría de Maxwell, se tiene que interpretar a la energía como una función del espacio continua para todos los fenómenos electromagnéticos, incluida la luz, mientras que según la actual interpretación de los físicos la energía tiene que ser representada como una suma que se extiende sobre todos los átomos y electrones. La energía de un cuerpo ponderable no puede descomponerse en cualquier número de partículas o en cualesquiera partículas pequeñas, mientras que según la teoría de Maxwell (o en general según toda teoría ondulatoria) la energía de un haz de luz emitido por una fuente puntual se puede distribuir continuamente en un volumen siempre creciente”.

- ❖ ¿Cómo se interpreta la energía?
- ❖ ¿Cuál es su relación de la energía y la luz?
- ❖ ¿Cuál es la contradicción que identifica Albert Einstein? ¿Qué problemas implicaría?

“La teoría ondulatoria de la luz operante con funciones espaciales continuas, ha demostrado representar excelentemente los fenómenos ópticos puros y probablemente no sea nunca sustituida por otra teoría. Sin embargo, no se pierda de vista que las observaciones ópticas se refieren a promedios temporales no a valores momentáneos y que a pesar de la comprobación íntegra de la teoría de la difracción, reflexión, refracción, dispersión, etc., por medio de la experimentación, es concebible que la teoría de la luz operante con funciones continuas en el espacio, conduzca a contradicciones con la experiencia cuando se aplica a los fenómenos de la producción y la transformación de la luz”.

- ❖ ¿Cuáles son los fenómenos que se pueden explicar desde la teoría ondulatoria?

- ❖ ¿Por qué los fenómenos de transformación y emisión de la luz presentan dificultades?

“Me parece ahora en efecto que las observaciones sobre la radiación del cuerpo negro, la fotoluminiscencia, la producción de rayos catódicos por luz ultravioleta y otros grupos de fenomenos concernientes a la producción o transformación de luz, parecen más comprensibles bajo la suposición de que la energía de la luz está distribuida discontinuamente en el espacio. Según la suposición que se propone hacer, la propagación de un haz de luz desde un punto no se distribuye continuamente en espacios más y más crecientes, sino que el mismo consiste en un número finito de cuantos de energía localizados en puntos del espacio, los cuales se mueven sin partirse y solo pueden ser absorbidos o emitidos como un todo”.

- ❖ ¿Qué hipótesis plantea Einstein para resolver el problema acerca del comportamiento de la luz?
- ❖ ¿Qué naturaleza de acuerdo con la hipótesis de Einstein se le puede asignar a la luz?

	COLEGIO PARROQUIAL CONFRATERNIDAD DE LA DOCTRINA CRISTIANA Actividad V: La interacción de la luz y un metal: el electroscopio 2021	
---	---	---

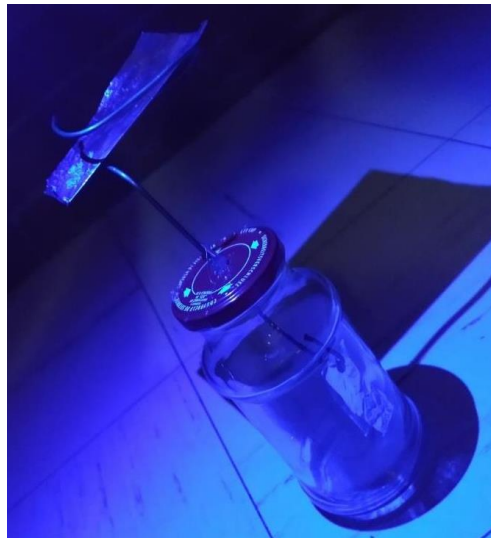
INTERACCIÓN DE LA LUZ Y UN METAL

ACTIVIDAD V

ELECTROSCOPIO

Con el electroscopio construido en el segundo periodo, llevar a cabo el siguiente procedimiento:

- 1) Hacer incidir luz blanca, sobre el parte superior del electroscopio, después de haber cargado este y verificar si se descarga.
- 2) Realizar el mismo procedimiento con luz ultravioleta.



Análisis

Analizar los resultados obtenidos de la experimentación con base en las siguientes preguntas:

- ¿Qué produce la descarga? ¿Por qué?
- ¿La descarga cambia cuando se ilumina con luz blanca? ¿con luz ultravioleta?
- Si se produce una descarga, ¿a qué se debe?
- ¿Cómo explicar el fenómeno de interacción de la luz con el metal y la descarga?
- ¿Si se varía la frecuencia, ocurre algo con la descarga?
- Con el docente realizar la siguiente lectura, subrayando las ideas importantes, escriba las inquietudes que le deja el texto y relaciónelas con sus explicaciones.

Texto adaptado de: Fowler M.

https://galileo.phys.virginia.edu/classes/252/photoelectric_effect.html

La predicción más dramática de la teoría del electromagnetismo de Maxwell, publicada en 1865, fue la existencia de ondas electromagnéticas que se movían a la velocidad de la luz, y la conclusión de que la luz en sí misma era una onda. Esto desafió a los experimentadores a generar y detectar radiación electromagnética utilizando algún tipo de aparato eléctrico. El primer intento claramente exitoso fue el de Heinrich Hertz en 1886. Usó una bobina de inducción de alto voltaje para provocar una descarga de chispa entre dos piezas de latón, para citarlo,

"Imagine un cuerpo de latón cilíndrico, de 3 cm de diámetro y 26 cm de largo, interrumpido a la mitad de su longitud por una vía de chispas cuyos polos a cada lado están formados por esferas de 2 cm de radio".

La idea era que una vez que una chispa formaba un camino conductor entre los dos conductores de latón, la carga oscilaría rápidamente hacia adelante y hacia atrás, emitiendo

radiación electromagnética de una longitud de onda similar al tamaño de los propios conductores.

Para demostrar que realmente se emitía radiación, esta tenía que ser detectada. Hertz usó un trozo de alambre de cobre de 1 mm de grosor doblado en un círculo de 7,5 cm de diámetro, con una pequeña esfera de latón en un extremo, y el otro extremo del alambre tenía punta, con la punta cerca de la esfera. Añadió un mecanismo de tornillo para que la punta se pudiera mover muy cerca de la esfera de forma controlada. Este "receptor" fue diseñado para que la corriente que oscile hacia adelante y hacia atrás en el cable tuviera un período natural cercano al del "transmisor" descrito anteriormente. La presencia de carga oscilante en el receptor sería señalada por una chispa a través del (diminuto) espacio entre el punto y la esfera (típicamente, este espacio era de centésimas de milímetro). (Se sugirió a Hertz que esta brecha de chispas podría ser reemplazada como detector por una pata de rana preparada adecuadamente, pero eso aparentemente no funcionó).

El experimento fue muy exitoso: Hertz pudo detectar la radiación a una distancia de quince metros y, en una serie de ingeniosos experimentos, estableció que la radiación se reflejaba y refractaba como se esperaba, y que estaba polarizada. El principal problema, el factor limitante en la detección, era poder ver la pequeña chispa en el receptor. Al tratar de mejorar la visibilidad de la chispa, se encontró con algo muy misterioso. Para citar de nuevo a Hertz (llamó al transmisor chispa A, el receptor B):

"Ocasionalmente encerré la chispa B en una caja oscura para hacer más fácilmente las observaciones; y al hacerlo, observé que la longitud máxima de la chispa se hizo decididamente más pequeño en el caso de lo que era antes. Al retirar en sucesión las diversas partes del caso, se vio que la única parte que ejercía este efecto perjudicial era la que

apantallaba la chispa B de la chispa A. La partición en ese lado exhibió este efecto, no sólo cuando estaba en la vecindad inmediata de la chispa B, sino también cuando se interpuso a mayores distancias de B entre A y B. Un fenómeno tan notable requería una investigación más cercana ".

Luego, Hertz se embarcó en una investigación muy exhaustiva. Descubrió que la pequeña chispa del receptor era más vigorosa si estaba expuesta a la luz ultravioleta de la chispa del transmisor. Le tomó mucho tiempo darse cuenta de esto: primero buscó algún tipo de efecto electromagnético, pero descubrió que una hoja de vidrio protegía efectivamente la chispa. Luego encontró una losa de cuarzo que no protegía la chispa, después de lo cual usó un prisma de cuarzo para romper la luz de la gran chispa en sus componentes, y descubrió que la longitud de onda que hacía que la pequeña chispa fuera más poderosa estaba más allá de lo visible, en el ultravioleta.

En 1887, Hertz concluyó lo que debieron haber sido meses de investigación:

"... me limito en la actualidad a comunicar los resultados obtenidos, sin intentar ninguna teoría sobre la forma en que se producen los fenómenos observados".

- Realice un esquema del experimento de Hertz.
- ¿Cómo se da la interacción de la radiación con las placas metálicas?

El enfoque más simple de Hallwachs

Al año siguiente, 1888, otro físico alemán, Wilhelm Hallwachs, en Dresde, escribió:

"En una publicación reciente, Hertz ha descrito investigaciones sobre la dependencia de la longitud máxima de una chispa de inducción de la radiación que recibe de otra chispa de

inducción. Demostró que el fenómeno observado es una acción de la luz ultravioleta. No hay más luz sobre la naturaleza del fenómeno se pudo obtener, debido a las complicadas condiciones de la investigación en la que apareció. Me he esforzado en obtener fenómenos relacionados que ocurrirían en condiciones más simples, con el fin de hacer más fácil la explicación de los fenómenos. investigando la acción de la luz eléctrica sobre cuerpos cargados eléctricamente ".

Luego describe su experimento muy simple: se montó una placa circular limpia de zinc en un soporte aislante y se unió con un cable a un electroscopio de hoja de oro, que luego se cargó negativamente. El electroscopio perdió su carga muy lentamente. Sin embargo, si la placa de zinc se expuso a la luz ultravioleta de una lámpara de arco, o al quemar magnesio, la carga se escapó rápidamente. Aunque el experimento de Hallwachs ciertamente aclaró la situación, no ofreció ninguna teoría de lo que estaba sucediendo.

- ¿Podría ser que la luz ultravioleta de alguna manera estropeó las propiedades aislantes del soporte donde estaba la placa de zinc?
- ¿Podría ser que los efectos eléctricos o magnéticos de la gran corriente en la lámpara de arco causaron de alguna manera la fuga de carga?

En 1902, Lenard estudió cómo la energía de los fotoelectrones emitidos variaba con la intensidad de la luz. Usó una luz de arco de carbono y pudo aumentar la intensidad mil veces. Los electrones expulsados chocan contra otra placa de metal, el colector, que estaba conectado al cátodo por un cable con un amperímetro sensible, para medir la corriente producida por la iluminación. Para medir la energía de los electrones expulsados, Lenard cargó negativamente la placa colectora para repeler los electrones que se dirigían hacia ella. Por lo tanto, solo los electrones expulsados con suficiente energía cinética para subir esta

colina potencial contribuirían a la corriente. Lenard descubrió que había un voltaje mínimo bien definido que impedía que pasaran electrones. ¡Para su sorpresa, descubrió que este voltaje mínimo no dependía en absoluto de la intensidad de la luz! Duplicar la intensidad de la luz duplicó el número de electrones emitidos, pero no afectó las energías de los electrones emitidos. El campo oscilante más potente expulsó más electrones, pero la energía individual máxima de los electrones expulsados fue la misma que para el campo más débil.

- ¿Qué cambios realiza Hallwachs al experimento de Hertz?

Pero Lenard hizo algo más, con su lámpara de arco muy potente, hubo suficiente intensidad para separar los colores y comprobar el efecto fotoeléctrico con luz de diferentes colores. Descubrió que la energía máxima de los electrones expulsados dependía del color: la longitud de onda más corta y la luz de mayor frecuencia provocaban que los electrones fueran expulsados con más energía. Sin embargo, esta fue una conclusión bastante cualitativa: las mediciones de energía no fueron muy reproducibles, porque eran extremadamente sensibles al estado de la superficie, en particular a su estado de oxidación parcial. En el mejor vacío disponible en ese momento, se produjo una oxidación significativa de una superficie fresca en decenas de minutos. (Los detalles de la superficie son cruciales porque los electrones más rápidos emitidos son los que provienen directamente de la superficie, y su unión al sólido depende en gran medida de la naturaleza de la superficie:

- ¿Es metal puro o una mezcla de átomos de metal y oxígeno?

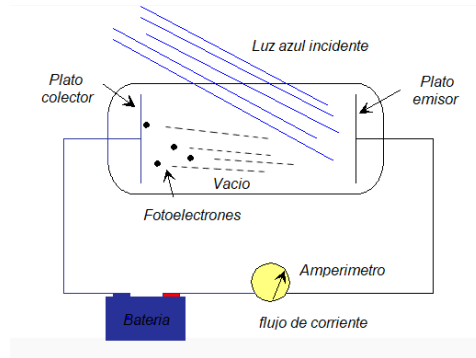


Figura 5. Tubos de vacío de Lenard – efecto fotoeléctrico. **Tomado de:**

https://galileo.phys.virginia.edu/classes/252/photoelectric_effect.html

- En la figura anterior, la batería representa el potencial que Lenard usó para cargar negativamente la placa colectora, que en realidad sería una fuente de voltaje variable. Dado que los electrones expulsados por la luz azul están llegando a la placa colectora, evidentemente el potencial suministrado por la batería es menor que voltaje mínimo para la luz azul. Muestre con una flecha en el cable la dirección de la corriente eléctrica en el cable.
- ¿Qué dificultades se pueden identificar en los planteamientos de Hertz, Hallwachs y Lenard, con respecto a sus explicaciones?

	COLEGIO PARROQUIAL CONFRATERNIDAD DE LA DOCTRINA CRISTIANA Actividad VI: El fenómeno de polarización desde lo cuántico 2021	
--	--	--

POLARIZACIÓN

PROCEDIMIENTO

Tomar cada uno de los lentes de las gafas 3D o polarizadores y ubicarlos en los soportes de click, en línea recta. Uno actuara como analizador y el otro como polarizador y ubicarlos a una distancia entre ellos de 10cm.

¿Qué se observa? ¿Haga una descripción y presente una explicación del funcionamiento de estos lentes o polarizadores?



Ahora mantenga uno sin movimiento y gire el otro a diferentes ángulos con respecto al que se mantiene sin moverse.

Describa lo que va observando. ¿Cambian las intensidades? ¿Con que ángulo con respecto al otro lente no se observa nada? ¿Por qué? Explicar el comportamiento.

- Con el docente realizar la siguiente lectura, subrayando las ideas importantes, escriba las inquietudes que le deja el texto y relaciónelas con sus explicaciones.

Texto adaptado de: Feynman R. Física Volumen I. Capítulo 37.

Un experimento con electrones

Se muestra esquemáticamente en la figura 37 3. Construyamos un cañón de electrones que consiste en un alambre de tungsteno calentado mediante una corriente eléctrica y rodeado por una caja de metal un agujero en ella. Si el alambre está a un voltaje negativo con respecto a la caja, los electrones emitidos el alambre serán acelerados hacia las paredes y algunos pasarán a través del agujero. Todos los electrones que saldrán del cañón tendrán (aproximadamente) la misma energía. Frente al cañón se tiene otra vez una pared (simplemente una delgada lámina metálica) con dos agujeros en ella. Más allá de la pared hay otra lamina que servirá como una “contención”. Frente a la contención colocamos un detector móvil. El detector puede ser un contador geiger, o quizás mejor, un multiplicador de electrones conectado a un auto parlante. a

Este experimento nunca ha sido hecho en esta forma. El problema es que el aparato tendría que

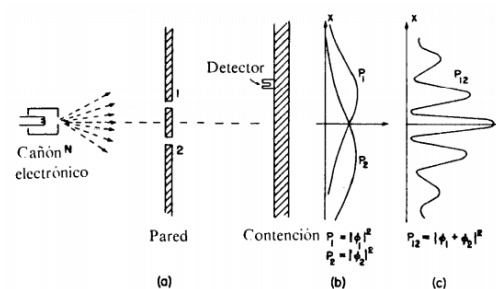


Figura 6. Experimento de la doble rendija con electrones. *Tomado de: Feynman R. Física Volumen I. Capítulo 37.*

ser construido a una escala imposiblemente pequeña para mostrar los efectos en los que estamos interesados.

La primera cosa que notamos con nuestro experimento de electrones es que oímos marcados "clic " provenientes del detector (esto es, del auto-parlante). Y todos los "clic" son iguales. No hay "medios clic".

También deberíamos notar que los "clic" llegan muy erráticamente. Algo como: clic clic-clic clic die clic-clic clic etc. Sin duda, han oído funcionar un contador geiger. Si contamos los clics que llegan en un tiempo suficientemente largo -muchos minutos, digamos- y luego contamos otra vez durante otro periodo igual, encontramos que los dos números son muy aproximadamente iguales. De modo que podemos hablar de una frecuencia media a la cual los clics se escuchan (tantos clics por minuto en promedio).

A medida que movemos el detector, la frecuencia a la cual los clics aparecen es mayor o menor, pero. el tamaño (sonoridad) de cada clic es siempre el mismo. Sí bajamos la temperatura del alambre en el canon, la frecuencia de los clics baja, pero todavía cada clic suena igual. También podríamos notar que, si ponemos dos detectores separados sobre la contención, uno u otro sonaría, pero nunca ambos al mismo tiempo. (Excepto que, en algún momento, si hubiera dos die muy cerca en el tiempo, nuestro oído no pudiera sentir la separación.) Por lo tanto, concluimos que donde quiera que lleguen a la contención, llegan en "gránulos". Todos los "gránulos" son del mismo tamaño: solamente llegan "gránulos" enteros, y llegan uno a uno a la contención. Diremos: "Los electrones llegan siempre en gránulos idénticos".

Al igual que en nuestro experimento con proyectiles, podemos ahora proseguir para encontrar experimentalmente la respuesta a la pregunta: "¿Cuál es la probabilidad relativa de que un "gránulo" electrónico llegue a la contención a diversas distancias x del centro? Como antes, obtenemos la probabilidad relativa, observando la frecuencia de los clics, manteniendo constante el funcionamiento del cañón. La probabilidad con la cual los "gránulos" llegan a un x particular es proporcional a la frecuencia media de los clics en ese x . El resultado de nuestro experimento es la interesante curva, marcada P_{12} en la parte (c) de la figura.

	<p>COLEGIO PARROQUIAL CONFRATERNIDAD DE LA DOCTRINA CRISTIANA</p> <p>Actividad VII: El experimento de la doble rendija y la introducción a la mecánica cuántica</p> <p>2021</p>	
---	--	---

¿CÓMO EXPLICAR EL COMPORTAMIENTO DUAL DE LA LUZ?

Objetivo

Realizar una aproximación alrededor del experimento de la doble rendija.

Materiales

- Un CD
- Un laser
- Una hoja transparente de acetato grueso tamaño carta
- Tijeras
- Vinilo color negro
- Un pincel
- Un alfiler
- Clicks de hojas
- Un metro
- Unas gafas 3D

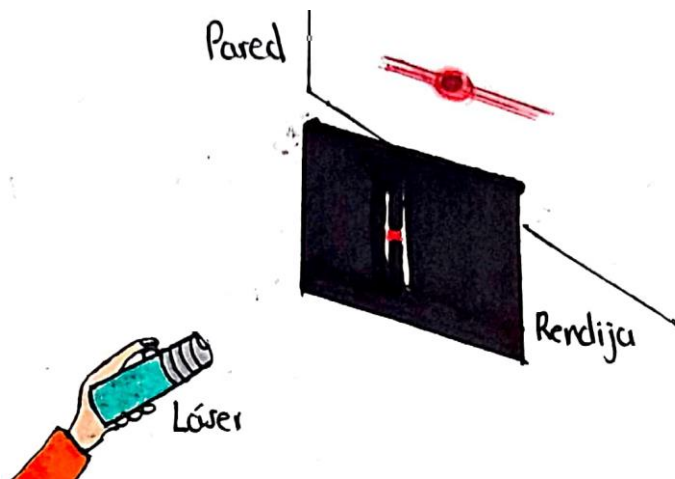
PRE – LABORATORIO

1. ¿Qué idea o noción tiene de una rendija?
2. ¿Cuál es el funcionamiento de una rendija?

PROCEDIMIENTO

1. Tome la hoja de acetato y recorte cuatro cuadros de 7cm x 7cm.
2. Realice tres pasadas de vinilo sobre el acetato dejando secar, por cada pasada.
3. Con el alfiler después de estar bien seco, haga para cada uno de los tres cuadros, dos ranuras con distancias muy pequeñas entre cada ranura y con el cuadrado restante haga una sola ranura.
4. Considere una pared blanca y a 4m de la pared ubique cada uno de los cuadros en el soporte (no todos a la vez).
5. A una distancia de 30cm ubique el láser encendido apuntando a las ranuras de los cuadros respectivamente.

Antes de realizar la observación, ¿Qué espera observar? ¿Por qué?



ANÁLISIS

Analizar los resultados obtenidos de la experimentación con base en las siguientes preguntas:

- ¿Qué se observa en la pared?

- ¿Qué explicación física se puede obtener de lo observado?
- ¿Existen diferencias con lo que se observó con el CD?
- Al realizar las observaciones a diferentes distancias, ya sea acercando la rendija a la pared o al láser ¿qué se puede concluir?
- ¿Por qué si solo hay dos rendijas, se ven más de dos puntos en la pared?
- ¿Hay alguna variación en la intensidad de luz en cada uno de los casos?