

LA ESPECTROSCOPIA Y SU
DESARROLLO COMO UNA
HERRAMIENTA DIDÁCTICA PARA
COMPRENDER LA ESTRUCTURA DE LA
MATERIA

JEAN YECID PEÑA TRIANA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias
Bogotá
2012

LA ESPECTROSCOPIA Y SU DESARROLLO
COMO UNA HERRAMIENTA DIDÁCTICA PARA
COMPRENDER LA ESTRUCTURA DE LA
MATERIA

JEAN YECID PEÑA TRIANA

Trabajo final presentado como
requisito parcial para optar al título de

*Maestría en la Enseñanza de las Ciencias
Exactas y Naturales*

Director

BENJAMÍN CALVO MOZO
Observatorio Astronómico Nacional

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias
Bogotá
2012

Nota de Aceptación

Aprobado

BENJAMÍN CALVO MOZO
Director.

xxxxxxxxxx.
Calificador 1

xxxxxxxxxx.
Calificador 2

Bogotá, Junio de 2012

Agradecimientos

Para el desarrollo de éste trabajo quiero dar las gracia al Padre rector Carlos Baudilio Parra, quien me cedió los espacios del colegio Claretiano de Bosa para aplicar la propuesta de la unidad didáctica y los estudiantes del grado once que pertenecieron al grupo piloto. Además gracias al profesor Benjamín Calvo por su colaboración.

Resumen

La presente propuesta didáctica está enfocada a uno de los hechos más importantes en la historia de las ciencias: la observación de líneas espectrales y su relación con la estructura de la materia. Para llegar a ésta relación se induce a revisar la evolución histórica de los conceptos de materia, campo eléctrico y magnético y la espectroscopia, hasta llegar a la implementación de modelos atómicos que expliquen dicha relación. Para llegar a ésta relación se propone una unidad didáctica de nueve sesiones aplicadas a un grupo piloto utilizando diversos recursos didácticos diferentes a los convencionales, queriendo mostrar una secuencia lógica desde los orígenes de los conceptos primordiales involucrados hasta la relación entre la radiación y la materia.

Palabras Claves: Espectroscopia, átomo, emisión, absorción, discontinuidad, materia, espectro electromagnético

Abstract

This proposal is focused on teaching one of the most important events in the history of science: the observation of spectral lines and their relationship to the structure of matter. To reach this ratio leads to review the historical evolution of the concepts of matter, electric field and magnetic spectroscopy, up to the implementation of atomic models to explain this relationship. To reach this ratio suggests a nine-session teaching unit applied to a pilot group using various teaching resources than conventional ones, willing to show a logical sequence from the origins of the key concepts involved to the relationship between radiation and matter. **Keywords:** Spectroscopy, atom, emission, absorption, discontinuity, matter, electromagnetic

spectrum

Índice general

. Resumen	i
1. Introducción	viii
2. Una descripción histórica breve de la noción del átomo	2
3. Desarrollo conceptual del campo eléctrico y campo magnético	8
4. Desarrollo histórico de la espectroscopia	15
4.1. Localización de líneas oscuras en el espectro	18
4.2. Una línea brillante corresponde a una línea oscura	19
4.3. Primeras teorizaciones acerca del origen de las líneas espectrales	21
5. Los átomos a través de los modelos y su descripción actual	28
5.1. La naturaleza de los rayos X	31
5.2. ¿Qué es la radiactividad?	31
5.3. Estructura de los rayos catódicos	33
5.4. Sobre las radiaciones alfa, beta y gamma	36
5.5. Modelo nuclear del átomo	38
5.6. La armonía de los espectros y de la materia	39

6. Desarrollo de la unidad didáctica	47
7. CONCLUSIONES	55
A. Fotos	57
B. Desarrollo de la unidad didáctica	60
B.1. Sesión uno: La luz como onda [38]	60
B.2. Sesión dos: Desarrollo conceptual del campo eléctrico y campo magnético [39]	61
B.3. Sesión tres: Leyes que rigen la electricidad y el magnetismo [40]	62
B.4. sesión cuatro: Incidencia entre campos eléctricos y campos magnéticos [41]	63
B.5. Sesión cinco: El tubo de rayos catódicos y el descubrimiento del electrón [42]	64
B.6. Sesión seis: Radiactividad y modelo atómico de Rutherford [42]	65
B.7. Sesión siete: Radiación y modelo atómico de Bohr [43]	66
B.8. Sesión ocho: Desarrollo de la espectroscopia [44]	68
B.9. Sesión nueve: Experimentos de espectroscopia (relación entre materia y radiación)[45]	70
Bibliografía	71

Índice de figuras

A.1. Cambio de color de la flama al rociar sal común y su espectro respectivo	57
A.2. Observación del espectro del sol y la presencia de líneas negras	57
A.5. Observación de campos magnéticos	58
A.3. Localización de líneas negras en el espectro solar por Fraunhofer [28]	58
A.4. Electroscopio	58
A.6. Tubos de vacío	59

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Definición	Unidad SI
\vec{B}	Campos inducción magnética	<i>Tesla</i> (T)
c	Velocidad de la luz	m/s
\vec{E}	Campo eléctrico	N/C
e	electrón	$1,6022 \times 10^{-19}C$
e/m	Relación carga-masa	$1,75882012 \times 10^{11}C/kg$
$E = \hbar\nu$	Energía de cuantización	J
F_e	Fuerza electostática	N
H	Hidrógeno	$1,008uma$
h	Constante de Planck	$6,62 \times 10^{34}J \cdot s$
\hbar	Contante de Planck reducida	$h/2\pi = 1,064 \times 10^{34}J \cdot s$
i	Intensidad de corriente eléctrica	A
K	Constante de Coulomb	$8,99 \times 10^9 Nm^2/C^2$
l	Longitud del conductor	m
L	Inductancia	H
m	Masa	kg
N_A	Número de Avogadro	$6,025 \times 10^{23}$ (partículas)
q_i	Carga eléctrica	C
r	Distancia entre partículas	m
R	Resistencia	<i>Ohms</i>
R_H	Constante de Rydberg	$109721,61 cm^{-1}$
R_e	Radio de la esfera	m
t	Tiempo	s
uma	Unidad de masa atómica	$1,66 \times 10^{-27}Kg$
V	Voltaje	<i>Voltios</i>
v_i	Velocidad	m/s

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
ϵ_0	Permitividad eléctrica en el vacío	$8,8541878176 \times 10^{-12} F/m$	
η	viscosidad del fluido	$Pa \cdot s$	
μ_0	Permeabilidad magnética en el vacío	$4\pi \times 10^{-7} TmA^{-1}$	
λ_m	Longitud de onda	m	
λ_0	Constante de Balmer	$354,56 nm$	
ν	Frecuencia	s^{-1}	
ϕ	Flujo magnético	Wb	
τ	Período	s	
ω	Velocidad angular	rad/s	

1. Introducción

Las cosas y los acontecimientos que acaen en el mundo es lo que hay que organizar, estructurar y explicar [22, 25]. Desde este punto de vista, el énfasis en la labor docente puede encaminarse a generar condiciones para propiciar la organización de los fenómenos físicos [25]. Entonces es necesario disponer de material educativo que apoye este propósito, que adquiere la enseñanza de la física. Este trabajo de grado es un documento que sintetiza un proceso de conceptualización de uno de los hechos esenciales que conduce a la estructura atómica de la materia: la observación de líneas espectrales. Se espera que éste documento sirva de apoyo al profesor o al estudiante que quiera propiciar la organización del fenómeno atómico, en el aula de clase. El conocimiento acumulado que obtenemos sobre el comportamiento de los sistemas físicos constituye el fundamento de las teorías físicas. La teoría que conecta el conjunto de leyes fundamentales de la dinámica y estructura de la materia a escala atómica se denomina física cuántica [26].

Uno de los dominios de la experiencia que resultaron cruciales para el desarrollo de la física cuántica, lo constituyó la observación de líneas espectrales (espectros) que se observaban en las radiaciones emitidas por diferentes elementos químicos[1]; igualmente, los esfuerzos teóricos por explicar tales radiaciones fueron fundamentales en el desarrollo de la física cuántica. La comprensión del fenómeno de las líneas espectrales, ha dado

origen a la espectroscopia. La espectroscopia es el estudio analítico de las radiaciones emitidas o absorbidas por una muestra de sustancia, en función de la longitud de onda (o de su frecuencia) de dicha radiación [3]. Es innumerable los usos y aplicaciones de este conocimiento: caracterización de elementos químicos, resonancias magnéticas, equipos de rayos X.

Una de las nociones que ha evolucionado a través de la historia y que han dado origen a toda una lógica de explicaciones [22] es la composición de la materia. Para seguir una secuencia lógica, se involucra el estudio de la noción de campo eléctrico y campo magnético, presentando sus principales manifestaciones que dieron origen al estudio de la radiación. Por otra parte se toma la materia y la radiación como un sistema físico y se hace un estudio por medio de teorías físicas [23].

Estas teorías físicas se toman como referencia para recurrir a una serie de pruebas o ensayos para indagar su procedencia, su estructura, sus propiedades y sus características. Estas pruebas dan origen a una idea [22] o modelo que imaginamos nos permitirá formular predicciones [23], como por ejemplo los modelos atómicos.

Este conocimiento se ha establecido después de grandes esfuerzos por organizar, estructurar y explicar las evidencias experimentales. Basta leer textos sobre la historia de la teoría cuántica para notar la exigente actividad de conocer éste ámbito de la naturaleza [1, 25]. La actividad de conocer tanto individual como por parte de una comunidad, requiere de distintos acciones del pensamiento como: asociar, relacionar, clasificar, organizar, teorizar, estructurar, etc.

Es importante para la formación académica del docente vivenciar procesos que conlleven abordar de manera efectiva, una práctica en la que las estrategias que se planteen sean de forma diferente, esto con el fin de que el conocimiento se vea como el resultado

de un proceso en el cual el docente muestre y motive en sus educandos, la necesidad de los aprendizajes como herramientas útiles que puedan ayudar a desarrollar potencialidades y competencias que se relacionen con la realidad en la que viven [10].

Estas estrategias deben favorecer también la participación activa de los estudiantes en torno a la construcción de sus conocimientos y su propio sentido de vida. Para ello, se deben incentivar hábitos de lectura, de autonomía y despertar o reavivar esa curiosidad y fascinación propias de la investigación, en este caso científica [10].

La idea entonces debe orientarse a que los estudiantes comprendan los procesos de la información a la que acceden, ofreciéndoles la oportunidad de crear a través de ello, la capacidad para relacionar y transformar, estos pueden convertirse en algo tangible que beneficie a las personas. Es decir, que hay que formar ciudadanos conscientes y activos frente a los problemas que plantean las complejas transformaciones científicas y tecnológicas, que hoy por hoy exigen decisiones colectivas y bien fundamentadas [10].

Una de las metas generales de la educación científica es que los estudiantes desarrollen ideas adecuadas sobre la ciencia y los procesos de construcción del conocimiento. Se trata de concebir la ciencia como una actividad racional siempre tentativa y por tanto, siempre sujeta a posibles revisiones y reformulaciones [11].

El aprovechamiento de la actividad mental es un elemento dinamizador que genera postular nociones que poco a poco van llevando un concepto [22] específico, donde las prácticas experimentales son las que juzguen éstas ideas, y de ésta manera, plantear un modelo implica crear un contexto donde los datos guarden una cierta coherencia, y no seguir pensando que la física es solamente una acumulación de conocimientos que no evidencia su fundamento y por lo tanto se convierte en una acumulación de productos [12], sin que haya la necesidad de organizar, estructurar y explicar dichas ideas desde

un punto de vista crítico.

La primera visión de construcción del conocimiento se limita a una colección de productos, que se conoce como las teorías, procedimientos, estilo de análisis y aparatos de experimentación. Y la segunda visión recae en la actividad de conocer, donde pone la actividad científica como la repetición de procedimientos y resultados, proponiendo el determinar cuál es objeto de conocimiento y los criterios de validez del mismo, convirtiéndose en reflexiones y debates permanentes [12].

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: en el capítulo uno se muestra una descripción histórica de la noción de átomo. En el capítulo dos se presentan el desarrollo de los conceptos de campo eléctrico y magnético. En el capítulo tres se destacan algunos hechos observacionales y algunas teorizaciones que se dieron históricamente en las primeras organizaciones que permitieron caracterizar la idea de línea espectral. En el capítulo cuatro se muestra los átomos a través de modelos y su íntima relación entre las líneas espectrales y la estructura de la materia, y en el capítulo cinco se da a conocer el marco pedagógico del desarrollo de la unidad didáctica.

2. Una descripción histórica breve de la noción del átomo

El propósito de éste capítulo es mostrar la preocupación principal que tiene el hombre en encontrar una explicación del mundo que los rodea. Estas ideas están fundamentadas en encontrar las bases en que está constituida la materia.

Nosotros vivimos en un universo en expansión maravilloso. Al igual que el universo, nuestra mente también da lugar a describir los hechos más representativos que tenemos. Para dicha descripción podemos ubicar como base el espacio-tiempo y la materia como el personaje principal de una obra.

Este personaje debe tener forma y se puede pensar como una colección de libros enciclopédicos de los que se pueden dividir hasta el punto donde las partículas sean indivisibles e inmutables (idea de átomo)[7]. Estos planteamientos fueron realizados por el griego Demócrito, en el siglo V antes de Cristo, donde la materia estaba compuesta por pequeñísimos corpúsculos rodeados de espacios vacíos. Otra idea sobre la formación de ese personaje (la materia) fue asociado por la constitución de cuatro elementos primordiales, tierra, agua, aire y fuego. Entonces este personaje al que se puede combinar con esos cuatro elementos recibiría el nombre de materia.

La cantidad de materia que posee un cuerpo la podemos cuantificar como masa, con ella podemos asociar algunas propiedades de la materia para su estudio como es el caso del cociente entre la masa y el volumen, al cual le llamamos densidad [7]. Otra propiedad de estudio es encontrar la composición de la materia, ya que los diferentes cuerpos materiales al aplicarle calor o corriente eléctrica los podemos separar en sus constituyentes. Estos constituyentes reciben el nombre de elementos ya que son casos específicos de algún cuerpo simple, inmezclable y que constituyen la base de los cuerpos mezclados. Este pensamiento lo planteaba Roberto Boyle (1627-1691) y además agregaba la clasificación de sustancias separables y las no separables[7]. Esta clasificación fue ubicada en una tabla con los elementos conocidos en la época por Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794)[1, 7].

Otro aporte dado por Lavoisier en 1774 fue la de formular la ley de conservación de la masa, mediante un experimento que consistió en medir las masas de estaño y del aire contenido en un recipiente antes y después del calentamiento, el cual forma óxido de estaño y sumado con el aire restante, encontró que sus masas eran iguales. Lo que llegó a enunciar que en toda reacción química la masa de las sustancias formadas es igual a la masa de los reactivos [52]. Entre 1794 y 1804 Joseph Proust (1754-1826) descubrió que las proporciones de la masa de cada uno de los elementos de un compuesto se mantenían igual que el compuesto formado por dichos elementos y no adquiriría un valor intermedio [7]. Así dos compuestos difieren entre sí por las proporciones de los elementos sin apreciarse composiciones intermedias o mixtas. Este análisis llevó a la ley de las proporciones definidas o constantes.

La idea de elemento se basa en la exploración de la naturaleza íntima de la materia, exploración que conlleva a pensar en unidades de medición que para este caso son los átomos. Esta idea de átomo fue rescatado por John Dalton (1766-1844) [50] en 1800

y certifica la ley de las proporciones definidas propuesta por Proust. Él afirma que las proporciones de masa de todos los elementos en los cuales pueden ser descompuesta dicha sustancia no cambia; por ejemplo, el agua contiene un gramo de hidrógeno por 8 gramos de oxígeno, la sal de cocina tiene un gramo de sodio por cada 1.5 gramos de cloro, quiere decir que 2 gramos de sodio equivale a unos 3 gramos de cloro. De esta forma 100 gramos de sal contiene en primera aproximación, unos 39 gramos de sodio y del orden de 61 gramos de cloro; por lo tanto, los elementos constituyentes se combinan siempre de acuerdo a las mismas y determinadas reglas y así podemos concluir que en el agua hay del orden 2 gramos de hidrógeno por cada 16 gramos de oxígeno [7].

Si únicamente números enteros de átomos pueden combinarse para formar moléculas, solamente son posibles razones de pequeños números enteros, esta ley de las razones se conoce la ley de las proporciones múltiples [7]. Ahora la tarea consiste en determinar el número de partículas que posee un cuerpo en un volumen dado; por ejemplo, podemos indagar si gases diferentes tienen igual número de partículas en volúmenes idénticos. Es bien conocido que Joseph-Louis Gay-Lussac (1778-1850) [50] investigó cuidadosamente la razón de los volúmenes de los gases hidrógeno y oxígeno para formar agua también gaseosa, encontrando que si se tiene una unidad de volumen de oxígeno, se necesita el doble de dicho volumen de hidrógeno para formar agua gaseosa, la cual ocupa un volumen igual al que ocupaba el hidrógeno, osea el doble del volumen que ocupa el oxígeno. En términos simbólicos esto corresponde a lo que modernamente utilizamos:



En este raciocinio Gay-Lussac (1778-1850) utilizó para los gases descritos las mismas presiones y temperaturas. Así que Gay-Lussac en realidad estaba proponiendo que mientras los reactantes sean gaseosos, sus proporciones intervienen en números enteros para formar un compuesto dado. Si se tienen ahora gases no reactantes a diferentes

presiones en forma individualizada, Dalton en 1801, encontró que al mezclarlos, la presión total es igual a la suma de las presiones anteriores. En otras palabras, la presión total de una mezcla de gases es igual a la suma de las componentes individuales. A esto se le conoce como la ley de las presiones parciales.

Observemos que se tenían otras leyes de los gases, como por ejemplo la ley de Robert Boyle (1627-1691) en 1662 [50], afirma que a una temperatura constante, el volumen ocupado por un gas es inversamente proporcional a su temperatura. Casi cuarenta años después en 1702 Guillaume Amontons (1663 - 1705) estudió el comportamiento de los gases en un volumen dado, es decir a volumen constante, y encontró que la presión del gas es directamente proporcional a su temperatura.

Si bien Jacques Charles (1746-1823) nunca publicó su estudio sobre el comportamiento de los gases [50], en 1784 encontró la ley que lleva su nombre, en la cual estudió los gases a una presión dada encontrando que el volumen del gas es directamente proporcional a la temperatura ¹.

En resumen:

La ley de Boyle: si la temperatura es constante, tenemos:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 : \text{constante} \quad (2.2)$$

La ley de Amontons: si el volumen es constante, tenemos:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} : \text{constante} \quad (2.3)$$

La ley de Charles: si la presión es constante, tenemos:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} : \text{constante} \quad (2.4)$$

¹En las expresiones anteriores los subíndices 1 y 2 se refieren a los estados diferentes de estudio.

Queremos expresar que la ley de Amontons [50] se conoce popularmente como la ley de Gay-Lussac, pero el primero realizó sus trabajos casi un siglo antes que éste. Sin embargo Gay-Lussac hizo su aporte fundamental en la ley de los gases reactivos que nos lleva a pensar en que los mismos están constituidos por partículas, bien sean átomos o moléculas, pero que de todas maneras entran en un número entero de veces para construir el gas dado.

Una hipótesis planteada en 1811 por Amedeo Avogadro (1776-1856), conduce a describir que el número de partículas contenidas en volúmenes idénticos de gases a la misma temperatura y presión son iguales, a lo cual se le denominó la ley de Avogadro [1, 7].

Simbólicamente si tenemos dos gases con iguales cantidades de volumen V , a presión P y temperatura T , entonces, $\frac{V \cdot P}{T}$ es directamente proporcional al número de partículas del gas, el cual es entonces igual para los dos gases dados. Combinando todas las leyes se tiene la ley de los gases ideales.

La primera tabla de pesos atómicos la publicó Dalton en 1805 la cual tomó al hidrógeno como unidad de masa atómica (uma). Jean Baptiste Perrin (1870 - 1942) [51] fue el primero en calcular el número de Avogadro, conocido como el número de átomos de hidrógeno que están contenidos en un gramo del mismo, y se tiene entonces el concepto de mol para cualquier sustancia, como aquel que tiene un número Avogadro con sus constituyentes fundamentales.

Hoy en día, no se utiliza el gramo como unidad de masa atómica. En efecto, fue sustituido inicialmente por el oxígeno 16 y modernamente se utiliza como unidad de masa atómica ² a un $\frac{1}{12}$ de la masa de un mol de carbono ¹²C. Dentro de nuestra nomenclatura

²Donde u es la unidad de masa atómica conocida también como Dalton (Da) y su equivalencia actual es de $1.660538921 (27) \times 10^{-27} Kg$ [54]

la masa de los siguientes elementos la podemos considerar [53]:

- ${}^1H = 1,008664u$
- ${}^4He = 4,002603u$
- ${}^{12}C = 12,00000u$
- ${}^{14}N = 14,003074u$
- ${}^{16}O = 15,994914u$
- ${}^{56}Fe = 55,934937u$
- ${}^{58}Ni = 57,9353429u$

El británico William Prout (1785-1850)[55] en 1816 se dio cuenta que algunos elementos poseían masas atómicas que no estaban cerca a números enteros. La masa atómica es simplemente el promedio de la medición de varios átomos del mismo elemento; a ellos se le conoce como los isótopos, además Prout sugirió que todos los elementos podrían de hecho estar formados en alguna forma por la unión de átomos de hidrógeno.

Estas afirmaciones conllevan a pensar en una estructura interna de la materia: los átomos. Dotándolos de leyes que satisfacen el estudio de los diferentes elementos (conocidos hasta el momento), en combinaciones realizadas con otros elementos para formas compuestas (idea de molécula). Estas explicaciones requieren de un modelo que sustente aquellas leyes y logre involucrar la composición de la materia con los átomos. En el capítulo cuatro, me centro en revisar cómo ese modelo fue tomando diversas modificaciones hasta convertirse en lo que actualmente conocemos como el modelo atómico de Bohr. En el siguiente capítulo se enfatizará en dos conceptos que ayudaron a determinar la constitución de la materia, los campos eléctricos y magnéticos.

3. Desarrollo conceptual del campo eléctrico y campo magnético

En este capítulo se muestran los diferentes progresos conseguidos en el estudio de la electricidad y el magnetismo a través de la historia, resaltando los hechos más significativos en que fue aplicado estos conocimientos, que hoy por hoy constituyen un elemento primordial en la tecnología moderna.

En la antigua Grecia, fue Tales de Mileto (630-550 antes de Cristo)[56, 57] quien encontró que al frotar piedras formada de resina vegetal fosilizada llamada ámbar ¹, sobre las pieles atraen objetos pequeños. A este proceso de contacto con otro material directo se le denomina efecto triboeléctrico que es un tipo de electrificación [7].

Esta propiedad de atracción se evidencia en varias sustancias cuando son frotadas en distintos objetos y fue recopilado 300 años después por el griego Theophrastus (374-287 antes de Cristo)[56, 57] que escribió el primer tratado científico sobre electricidad. En la ciudad de Magnesia del Meandro (Asia menor), encontraron un mineral que poseía la propiedad de atraer partículas de hierro y de algunos metales más. A este mineral se le dio el nombre de magneto que es equivalente a un imán y a sus propiedades,

¹Proviene del griego *elekton* que significa electricidad

interacciones magnéticas.

Un imán es un instrumento que consta de dos partes, el polo norte y el polo sur magnético. Estos dos polos no se pueden separar, quiere decir, en la naturaleza no existen monopolos magnéticos y cumplen el principio de atracción entre polos opuestos y repulsión con polos iguales [56, 57]. Éste principio se puede evidenciar colocando sobre un imán una hoja de papel y se le rocía limadura de hierro, mostrando así las líneas de campo magnético. Luego se colocan dos imanes enfrentados según su polo, ya sea de atracción o repulsión y se repite la experimentación anterior, mostrando las curvas generadas por las líneas de campo según sea su naturaleza. De esta manera cuando se coloca una aguja imantada sobre un corcho tal que flote en un recipiente con agua, se muestra una alineación por parte de la aguja mostrando el norte geográfico. Este es el principio de la brújula que es utilizada como instrumento de ubicación y dirección.

En 1600 Willian Gilbert (1544-1603) [56, 57] clasificó sustancias por su fuerza eléctrica de atracción llamando cuerpos eléctricos (actualmente aislantes) y cuerpos aneléctricos (actualmente conductores). En 1672 Otto von Guericke (1602-1686)[56, 57] sacó chispas de un globo de azufre e inventó la primera máquina que produce cargas eléctricas. Francois de Cisternay Du Fay (1698-1739)[56, 57] en 1733 evidenció la existencia de dos cargas eléctricas y las llamó electricidad vitria (positiva) y resinosa (negativa).

E. G. Von Kleist (1700-1748) y Pieter Van Musschenbroeck (1692-1761)[56, 57] en 1745 encontraron la forma de almacenar energía eléctrica o lo que actualmente se le conoce como condensador. El primer condensador es conocido con el nombre de la botella de Leyden ya que fue la ciudad donde se realizaron éstos experimentos. La botella es un dispositivo que consta en su interior unas láminas de estaño que son cargadas por su parte exterior con algún objeto cargado triboelectricamente (electrización por

contacto), dicha carga se almacena en las láminas de estaño. En 1752 Benjamín Franklin (1706-1790)[56, 57] inventó el pararrayos y postuló que la electricidad era un fluido existente en toda la materia, además este fluido consta de dos sustancias, las positivas y las negativas según sea su exceso o defecto.

Al tomar un frasco de vidrio con tapa plástica y atravesándose un alambre por la mitad de la tapa y colocando en un extremo una bola de aluminio y en el otro costado dos láminas del mismo material, se puede construir un electroscopio semejante al que en 1785 Charles Augustin de Coulomb (1736-1806)[56, 57] construyó con láminas de oro y una balanza de torsión. Al acercar un cuerpo electrizado por inducción al extremo superior del electroscopio, esto es, sobre la bola de aluminio, se presenta un fenómeno de repulsión entre las cargas iguales y atracción entre cargas diferentes (principio de las cargas).

Los fragmentos moleculares cargados se les conocen como iones y los gases que presentan estas características se pueden comportar como conductores [7]. En el experimento de Coulomb en la parte interior de su botella coloca una barra de torsión la cual indica que entre más fuerza la suspensión de la barra es mayor. Por tanto, basado en el ángulo de torsión se pudo medir la fuerza eléctrica y, variando las distancias entre los cuerpos cargados se pudo demostrar que la acción de atracción o repulsión entre dichos cuerpos, se comporta inversamente proporcional al cuadrado de la distancia y directamente proporcional al producto de sus cargas. A esta conclusión se le conoce con el nombre de fuerza eléctrica y análogamente se comporta como la ley de gravedad de Newton [1]. La unidad de carga se la llama Coulomb en honor a estos trabajos e investigaciones que manifiesta la carga en reposo o lo que actualmente se le conoce como electrostática.

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \tag{3.1}$$

Si un cuerpo presente en el planeta Tierra es lanzado hacia arriba, éste sentirá una fuerza externa que no lo deja moverse libremente y es atraído inmediatamente al suelo. Ésta fuerza que el objeto presencié es la fuerza de gravedad. Análogamente al interactuar con cargas eléctricas estas también forman una región donde pueden interactuar con todo cuerpo que entre a ese espacio ya sea de forma atractiva o repulsiva. Esta región del espacio generado por una carga eléctrica se le conoce como campo eléctrico.

$$E = \frac{F_e}{q_0} \quad (3.2)$$

Un avance sustancial lo desarrolló Luigi Galvani (1737-1798)[56, 57] al encontrar que los cuerpos contienen cargas eléctricas, basado en la experimentación en partes nerviosas en las ancas de ranas, demostrándolo en 1780. En 1800 Alejandro Volta (1745-1827)[56, 57] construye la primera celda electrostática que consta de dos bornes, el positivo y el negativo, esta batería fue capaz de producir corriente eléctrica. Una batería es un instrumento que produce una reacción electroquímica generando portadores de carga que se dirigen del borne negativo hacia el positivo, el trabajo realizado por una carga en desplazarse desde un punto a otro es conocido como la fuerza electromotriz y su unidad es el voltio en honor a su creador.

En 1812 Siméon-Denis Poisson (1781-1849)[56, 57] calculó matemáticamente la distribución de cargas eléctricas sobre un conductor y en 1824 demostró que estas mismas distribuciones se pueden aplicar al magnetismo. El fundamento teórico de estas investigaciones está basado para enunciar las leyes de la electrostática.

Al utilizar una brújula la aguja imantada siempre direcciona el norte geográfico de la Tierra, pero si al lado este aparato hacemos pasar una corriente eléctrica esta dirección es modificada, aparece un momento de torsión donde la aguja se mueve de acuerdo a la

regla de la mano derecha. En 1819 Hans Christian Oersted (1777-1851)[56, 57] realizó este experimento al que no pudo demostrar su naturaleza. Un año más tarde en 1820 André Marie Ampere (1775-1836)[56, 57] descubre que el paso de la corriente eléctrica por un conductor produce campos magnéticos que hacen que la aguja de la brújula se desvíe de su posición inicial. A partir de este momento los fenómenos eléctricos y magnéticos ya no son ramas de estudio separados, por el contrario se unifican formando lo que hoy se conoce como electromagnetismo.

En el mismo año (1820) Jean-Baptiste Biot (1774-1862) y Felix Savart (1791-1841)[56, 57], descubren la relación que hay entre una corriente y un campo magnético que esta produce, basados en la ley de Ampere definen que la intensidad del campo magnético producido depende de la corriente eléctrica inducida en un circuito. A esta resultado se llega por medio de la ley Biot y Savart.

$$B = \frac{\mu_0 i \cdot l \cdot \sin\theta}{4\pi r^2} \quad (3.3)$$

Donde B es la magnitud del campo magnético, i es la corriente, l la longitud del conductor, r la distancia y μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío.

Si tomamos una puntilla y le envolvemos aislamiento de cobre formando un carrete y lo conectamos a una batería, construimos un electroimán, tal como lo hizo en 1823 William Sturgeon (1753-1850)[56, 57]. Este aparato funciona como un imán cuando el circuito eléctrico se encuentra conectado a una batería, al desconectar deja de funcionar. Esto quiere decir, si la corriente que fluye por un circuito genera campo magnético, entonces podemos generar magnetismo artificialmente por medio de estos dispositivos.

El paso de portadores de carga por un conductor en un tiempo dado se le conoce como corriente eléctrica y tiene como unidad fundamental el Ampere. Si realizamos la relación que existe entre el voltaje y la corriente eléctrica aparece una constante a la que

se llama resistencia, para muchos materiales la resistencia es constante, independiente del voltaje aplicado o de la corriente que pasa a través de él. A esta conclusión llegó en 1826 Georg Simón Ohm (1789-1854)[56, 57] y que se conoce como la ley de Ohm, enunciada de la siguiente manera:

$$\frac{\text{Voltaje}}{\text{corriente eléctrica}} = \text{Resistencia} \quad (3.4)$$

La fuerza generada por un electroimán o bobina depende directamente del número de vueltas que se le realice. Esta fuerza se le conoce como inductancia L y fue propuesta en 1828 Joseph Henry (1799-1878)[56, 57] cuando observo que la polaridad cambiaba al cambiar la dirección del flujo de corriente, la inductancia depende del flujo magnético ϕ y la corriente i que circula por la bobina, esta expresión es:

$$L = \frac{\phi}{i} \quad (3.5)$$

Cuando tomamos una bobina y le conectamos sus puntas a un microamperímetro y acercamos un imán, observamos que la aguja de éste aparato se mueve evidenciando la presencia de corriente eléctrica, en 1831 Michael Faraday (1791-1867)[56, 57] estableció que el magnetismo produce electricidad a través del movimiento y que constituye bases para su ley de inducción electromagnética. Este valor de electricidad no es constante, por el contrario, varia en el tiempo en magnitud y sentido formando lo que hoy se conoce como la corriente alterna, principio de los generadores y motores eléctricos. En honor a Faraday el Faradio es la unidad de medida de la Capacitancia Eléctrica. La ley de Faraday establece la variación del flujo magnético ϕ a través del tiempo t produce un voltaje V variable, ésta relación conduce a:

$$V = \frac{\phi}{t} \quad (3.6)$$

En la recopilación de información presentada anteriormente se puede demostrar que la electricidad y el magnetismo son manifestaciones del mismo fenómeno, fenómeno

que se le llamo electromagnetismo. Éste trabajo lo realizó James Clerk Maxwell (1831-1879)[56, 57], quien agrupo un conjunto de leyes a las que más tarde se le conocen como las ecuaciones de Maxwell y con ellas se funda el electromagnetismo clásico. Otro de los grandes aportes presentados por Maxwell es considerar la luz como una onda electromagnética, hecho que corroboró Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894)[56, 57] en 1887 cuando las produjo y las detectó.

El hecho de hablar de ondas electromagnéticas define su capacidad de viajar en el vacío, no necesita de un medio elástico para su propagación y su velocidad se puede calcular con ayuda de las ecuaciones de Maxwell que predice los $3 \times 10^8 \frac{m}{s}$ ó lo que actualmente consideramos la velocidad de la luz.

4. Desarrollo histórico de la espectroscopia

El propósito de este capítulo es destacar algunos hechos observacionales y otros teóricos que se fueron presentando históricamente en los diferentes métodos experimentales de obtención de espectros (emisión y absorción), que fueron consecuencia en las primeras organizaciones para ir caracterizando la idea de línea espectral.

La luz proveniente del sol al incidir sobre un prisma de vidrio, se descompone en un conjunto de colores produciendo lo que se denomina espectro. Recíprocamente, al componer esos colores se recupera la luz normal.

Estas observaciones inducen a pensar cada color como una característica especial que integra la luz, pues igual que con los objetos materiales que constituyen un sistema, los colores se pueden separar y combinar para generar distintas percepciones [6].

Esta observación, inicialmente la realizó Isaac Newton en 1665; concluyendo que los colores no eran cualidades de la luz, derivadas de reflexiones o refracciones de cuerpos naturales (como se cree generalmente), sino propiedades originales o innatas [1]. Otro tipo de observación es consecuencia de calentar cuerpos sólidos y líquidos que emiten radiaciones cuando alcanzan una temperatura suficientemente alta. En 1752 Thomas

Melvill (1726-1753) hizo pasar por un prisma la luz que emitía una llama producida por sodio y observó un espectro continuo, surcado por una serie de líneas brillantes. Hasta el momento es la primera observación de un espectro de emisión [1].

Si utilizamos un mechero de alcohol, su llama alcanza los 1500 °C de temperatura [29] y enseguida le rociamos sal de cocina, lo primero que notamos es el cambio de color que sufre la llama y en segundo lugar lo observamos por medio de un espectroscopio. Percibimos su respectivo espectro continuo surcado por dos líneas brillantes en la franja del color amarillo. Característica que sólo se presenta en los compuestos que poseen sodio, ver (A).

Esas líneas brillantes se pueden entender como regiones donde llega más energía lumínica (es decir, hay un color que está llegando con mayor intensidad). Aunque pudiera pensarse que por ser el calentamiento de la sustancia uniforme, la brillantez también debiera ser distribuida uniformemente, pero no sucede así. Sólo una región se hace más brillante, lo cual inspira a pensar en desigualdades en la sustancia.

En 1802 cincuenta años después de los experimentos de Thomas Melvill, William Hyde Wollaston (1766 1828) detectò en el espectro solar unas líneas oscuras (que Newton no detectó) y que él tomó como los bordes de los colores naturales [1].

Esta observación se puede realizar oscureciendo el laboratorio con plástico negro y se deja pasar una cierta cantidad de luz solar (proceso de colimación) por un prisma de vidrio y observamos algunas líneas oscuras tal como lo indicaba Wollaston, ver (A).

Así como las líneas brillantes en un espectro deben captar la atención del observador, también se debe notar la presencia de regiones oscuras (líneas oscuras) en el espectro. En un ámbito cotidiano, una sombra aparece cuando se interpone un material que no deja pasar la luz entre la fuente y el observador [1]. Entonces surge un conjunto de

preguntas naturales en la observación de líneas oscuras en un haz de luz solar: ¿qué es lo que se está interponiendo?, ¿entre qué y qué?, ¿por qué las sombras son líneas bien delimitadas? ¹

Otro hecho significativo que se puede asociar a las diferentes tonalidades de color es la cantidad de calor que puede generar. Los cuerpos como las estufas eléctricas que al funcionar su fogón se pone al rojo vivo, notamos como al alejarnos de esta fuente sentimos la radiación que produce sin que nuestros ojos puedan detectar dicha radiación. Lo extraño es que ésta sensación no la vemos, la sentimos, quiere decir que se sale de nuestro espectro visible y a ésta región se le denominó infrarrojo. En 1800 para Sir Frederick William Herschel (1738-1822), los colores pueden filtrar distintas cantidades de calor y cada uno tiene una temperatura mayor que aumenta del violeta al rojo.

Lo crucial en su experimentación fue medir la temperatura en una zona ubicada un poco más allá de la luz roja del espectro y descubrió que esta región tenía la temperatura más alta de todas.[26]

Un año después en 1801 Johann Wilhelm Ritter (1776-1810) aprovechándose que el cloruro de plata reacciona con la luz solar, decidió medir la velocidad con que se oscurecía con las diferentes tonalidades del espectro. En esta experiencia encontró poco cambio en el color rojo, mientras que se oscurecía cada vez más cuando se acercaba al violeta. Al colocar el cloruro de plata más allá del violeta encontró que ésta sustancia reaccionaba intensamente en una zona donde la luz del sol no era visible. A esta región

¹Vale la pena resaltar que el tema de absorción de la luz ya era tratado alrededor de 1760 [Lambert, publicó un libro sobre fotometría], pero no se usa este conocimiento para explicar la observación de líneas oscuras [1]. A este nivel nos encontramos todavía lejos de abstraer una estructura de la materia como necesidad para explicar las líneas brillantes u oscuras que se observan.

se le llamo el ultravioleta. El experimento de Ritter, más el descubrimiento de Herschel, probaron formas invisibles de luz que existían más allá de ambos términos del espectro visible [27].

4.1. Localización de líneas oscuras en el espectro

Otro tipo de observaciones fueron realizadas años más tarde (1814-15) por Joseph von Fraunhofer (1787–1826) [1, 16, 18], quien utilizó rejillas de difracción elaboradas por él, y observó en el espectro solar más de 600 líneas oscuras. Un elemento conceptual que vale la pena resaltar tanto en la observación de líneas brillantes como de rayas oscuras es la variación de la intensidad luminosa cuando un rayo luminoso atraviesa o interpone un material. Un desarrollo fundamental en la conceptualización de las líneas espectrales es establecer el lugar del espectro en que se encontraban situadas las rayas oscuras. Esto permitirá la comparación de conjunto de rayas oscuras entre distintas fuentes. Inicialmente, fue el interés profesional de Fraunhofer quien necesitaba localizar en el espectro solar un punto de referencia que le permitiera medir con precisión los índices de refracción ² de los distintos materiales con los que construía las lentes de sus instrumentos ópticos [1].

Nótese que se inicia un proceso de ubicación de las líneas oscuras en el espectro solar, nombrando a las líneas más prominentes con las letras del alfabeto comenzando desde la A hasta la G y que desde luego se le conocen como líneas de Fraunhofer. De ésta manera ubicó 324 líneas en el espectro solar, ver(A).

²Grado de desviación de la luz al pasar por un cierto medio

4.2. Una línea brillante corresponde a una línea oscura

Haciendo que la luz solar llegase a un espectroscopio tras atravesar una llama de sodio; si se debilita suficientemente la luz solar, las oscuras líneas de Fraunhofer eran sustituidas por las líneas brillantes provenientes de la llama. El hallazgo de Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) fue advertir que si la intensidad del espectro solar aumentaba por encima de un cierto límite, las líneas D se hacían todavía más oscuras al interponer una llama de sodio [1, 18].

Esta observación era un caso particular de una situación general, una sustancia capaz de emitir una cierta línea espectral posee gran capacidad de absorber la misma línea en el caso de ser calentado previamente, la simple interposición de una llama de sodio de baja temperatura sería suficiente para producir artificialmente las líneas D en el espectro de una fuente de luz intensa que no las mostraba inicialmente.

Entonces las líneas brillantes de una sustancia se podían absorber por la misma sustancia, si se interponía a una temperatura adecuada (una llama absorbe los mismos rayos que emite). Así hay una equivalencia entre el espectro de emisión y el espectro de absorción de un elemento. Hecho que nos lleva a realizar algunas consideraciones generales y que constituyen los primeros pasos hacia la teorización de este conjunto de observaciones.

Al realizar el experimento de Melvill, se pudo comprobar que independientemente como se realice la experiencia, se observa que en realidad las líneas de color amarillo que surcan el espectro solar, corresponden a las líneas D oscuras (denominadas así por

Fraunhofer) cuando hay presencia de sodio ³. Entonces una sustancia capaz de emitir una cierta línea espectral posee gran capacidad de absorber la misma línea, por eso las líneas D son características del sodio.

De ésta manera Kirchhoff, en 1859 publicó sus observaciones e ideas sobre las líneas D observadas en el espectro solar que coincidían con las líneas amarillas brillantes emitidas por llamas que contenían sodio.

Kirchhoff revela un cambio conceptual. En su laboratorio utiliza dos tipos de espectros (emisión y absorción) y delicadamente superpone el uno con el otro [1]. La maravilla encontrada por Kirchhoff lo llevó a confirmar que la superposición de los dos tipos de espectros forma un espectro continuo, es como si uno fuera el positivo y el otro fuera el negativo, en conclusión uno es el inverso del otro. Esto quiere decir, el espectro de cualquier material o sustancia emite líneas en ciertas frecuencias que coinciden con las mismas líneas que hacen falta en el otro tipo de espectro, por lo que podemos anunciar que estas líneas son absorbidas [1, 2, 3, 4]. Otra manera de pensarlo es que en la misma frecuencia en que absorben, emiten.

Hasta este momento es la única conceptualización que se ha hecho con respecto a las diferentes manifestaciones de los espectros, pero sin tener ningún formalismo que me anuncie éste comportamiento que sufren las líneas espectrales.

³Hecho que demostró León Foucault (1819- 1868) en 1849 [1].

4.3. Primeras teorizaciones acerca del origen de las líneas espectrales

El espectrómetro de Kirchhoff y el mechero de Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899), fueron los protagonistas para el estudio espectral y crearon la idea que el conjunto de líneas espectrales, es característico de cada elemento y se toma como el registro natural de cada uno, al comprobar que éste registro es el mismo independiente de la clase de experimentación (absorción o emisión) que realice, ya que cada una de esas líneas corresponden a ciertas longitudes de onda, que es la razón esencial para identificar los diferentes elementos [1, 2].

La radiación que emite un gas o un cuerpo denso cuando es calentado nos brinda un espectro continuo, pero las líneas oscuras aparecen si este gas se pone delante de un emisor continuo más caliente, como lo que ocurre con el sol y la atmósfera terrestre. De ésta manera Kirchhoff y Bunsen resolvieron el problema de la composición de la atmósfera solar comparando éste espectro con las sustancias terrestres [1, 2, 3] descubriendo dos nuevos elementos: rubidio y cesio en los residuos de ciertas aguas minerales [1, 3].

Utilizando la misma técnica, descubre:

- William Crookes (1832-1919) en 1861 el talio [1].
- Ferdinand Reich (1799-1882) y Hieronymus Theodor Richter (1824-1898) en 1863 el indio [1].
- Joseph Norman Lockyer, (1836-1920) en 1869 encuentra en las protuberancias solares helio y fueron confirmadas en 1895 por William Ramsay (1852 -1916) y

John William Strutt, conocido como Lord Rayleigh (1842 -1919) al encontrarlo en el planeta Tierra [1].

- Paul E. Lecoq de Buisbaudran (1838 -1912) en 1875 el galio [1].
- Lars F. Nilson (1840 -1899) en 1879 el escandio [1].
- Clemens Alexander Winkler (1838 -1904) en (1886) el germanio [1].

En 1862 Anders Jonas Ångström (1814-1874) analizando el espectro solar encontró hidrógeno en su atmosfera y para expresar las longitudes de onda utilizó como unidad de medida la diezmillonésima parte de un milímetro y homenaje a él se le conoce a ésta unidad como Angstrong[1].

La física a través de su camino investigativo ha sufrido dos rupturas [4], la mecánica clásica y la mecánica cuántica. La primera nos asocia a los espectros como propiedades pertenecientes a la luz [1] sin poseer un fundamento teórico que esté a la base de dichas nociones y se ha tratado de explicarlas de modo empírico. La segunda ruptura, comienza entre los estudios realizados por modelar y formalizar matemáticamente dichas propiedades, para comprobar las ideas establecidas por la física clásica. A la primera parte del surgimiento de la mecánica cuántica se le llamó mecánica cuántica antigua [1], por no contar con los suficientes recursos conceptuales para explicar detalladamente lo que ocurría experimentalmente. Con los trabajos de Planck [1, 2, 3, 4, 5, 7, 8] se representa aquel recurso que revoluciona las concepciones de la física: la discontinuidad de la energía.

Al observar los diferentes espectros tanto de emisión como de absorción se pueden evidenciar un conjunto de líneas de idéntico aspecto para cada uno de los elementos observados. A este conjunto de líneas George Downing Liveing (1827 - 1924) y Sir

James Dewar (1842 -1923) [1, 3] en 1883 lo llamaron series espectrales. Estas series tienen la característica que al crecer el número de onda las líneas se van aproximando entre sí, al mismo tiempo que disminuye gradualmente su intensidad [3]. La separación entre cada dos líneas de una serie va disminuyendo progresivamente al aumentar su frecuencia de forma que al final de la serie existe una acumulación de infinitas líneas cada vez más débiles, que se llama límite de la serie. Más allá de éste límite aparece un espectro continuo. Éste espectro continuo puede ser observado tanto en emisión como en absorción [29].

Por otro lado, en 1885 Johann Jakob Balmer (1825- 1898) inspirado en la literatura publicada sobre los espectros [1, 2, 3, 4], descubre de forma empírica una sencilla ley matemática que relaciona las longitudes de onda de las líneas del espectro visible del hidrógeno.

En la siguiente expresión, se percibe la sencillez que contiene la serie de Balmer en función de su longitud de onda λ :

$$\lambda_m = \lambda_0 \frac{m^2}{m^2 - 4} \quad (4.1)$$

Donde

$$\lambda_0 = 354,56nm \quad (4.2)$$

Sus trabajos son motivados a partir de las observaciones del espectro del hidrógeno, donde encontró las cuatro líneas visibles en el espectro de absorción, sus longitudes de onda van del 410nm (violeta), 434nm (violeta), 486nm (azul) hasta 656nm (roja), y satisface perfectamente en su serie [1, 2, 3].

Éste avance realizado por Balmer fue confirmada experimentalmente en 1888 por Johannes Robert Rydberg, (1854-1919) [1, 2, 3, 4]. Estos datos son utilizados para predecir la longitud de onda de los fotones y otras radiaciones electromagnéticas emitidas por cambios de energía de un electrón en un átomo. Esta constante conocida como la constante de Rydberg expresa sus resultados en frecuencias ν y no en longitudes de onda λ , nos muestra un contenido más formal de la constante introducida inicialmente por Balmer, mediante la siguiente relación:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (4.3)$$

Donde ν es la frecuencia y c la velocidad de la luz, podemos utilizar la serie de Balmer en función de la frecuencia, así :

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (4.4)$$

Con $R_H = 109721,61/cm$; o lo que es equivalente a $13,6eV$, si se expresa en unidades de energía que es la constante de Rydberg. Él concluyó que el espectro de cada elemento se componía de tres tipos diferentes de series; uno en el que las líneas eran comparativamente nítidas y más intensas, situado en el rango visible, otro en el que las líneas eran difusas y un último que denominó serie principal aunque estaba formada sobre todo por líneas en el ultravioleta. Esta expresión generalizó las series espectrales a lo largo de todo el espectro electromagnético [1].

Estos cálculos se pueden mostrar mediante la longitud de onda (cálculo de Balmer) o por su frecuencia (cálculo de Rydberg), este ejercicio se puede fundamentar en el desarrollo de prácticas experimentales en el aula de clase, por ejemplo los cálculo realizados en la observación del espectro de hidrógeno muestran la exactitud de esta teorización.

Una forma más rápida y elegante de realizar este proceso es considerar esta operación

como la diferencia de términos espectrales ⁴ entre cualquier pareja de términos que dan a su vez el número de onda de otras líneas del espectro. Esto quiere decir, que existe un término variable y va tomando valores cada vez menores, mientras que existe otro término fijo; entonces ésta expresión se puede representar como:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{m_1^2} - \frac{1}{m_2^2} \right) \quad (4.5)$$

En donde $m_1 = 1, 2, 3, \dots$ y su valor es fijo para una serie dada, mientras que m_2 es mayor que m_1 y es variable. El valor de m_1 determina la serie espectral, por ejemplo, en el átomo de hidrógeno $m_1 = 2$ genera la serie de Balmer cuyas primeras líneas son visibles.

La primera línea de esta serie viene dada por $m_2 = 3, m_1 = 2$

$$\lambda = 656,3nm \text{ (roja), conocida como } H_\alpha \quad (4.6)$$

Para la segunda línea, $m_2 = 4, m_1 = 2$

$$\lambda = 486,1nm \text{ (azul), conocida como } H_\beta \quad (4.7)$$

Para la tercera línea, $m_2 = 5, m_1 = 2$

$$\lambda = 434,1nm \text{ (violeta), conocida como } H_\gamma \quad (4.8)$$

Para la cuarta línea, $m_2 = 6, m_1 = 2$

$$\lambda = 410,1nm \text{ (violeta), conocida como } H_\delta \quad (4.9)$$

Nótese, que el principio de combinación está relacionando diferencias entre estados energéticos o líneas espectrales; este proceso se puede encaminar a descifrar que aquella

⁴Principio de combinación de Ritz

diferencia mostrada en la expresión nos representa la transición entre niveles de energía sufrida por los electrones que oscilan entre sus niveles energéticos. De esta manera, podemos extender el cálculo a otras regiones del espectro, únicamente variando el primer término, ya que el valor de m_1 nos indica el lugar o ubicación que se desea revisar [3].

Serie de Lyman (1916) en el ultravioleta $m_1 = 1$ y $m_2 = 2, 3, 4, \dots$

$$\omega = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{m_2^2} \right) \quad (4.10)$$

Serie de Paschen (1908) en el infrarrojo $m_1 = 3$ y $m_2 = 4, 5, 6, \dots$

$$\omega = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{m_2^2} \right) \quad (4.11)$$

Serie de Brackett (1922) en el infrarrojo $m_1 = 4$ y $m_2 = 5, 6, 7, \dots$

$$\omega = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{m_2^2} \right) \quad (4.12)$$

Serie de Pfund (1927) en el infrarrojo $m_1 = 5$ y $m_2 = 6, 7, 8, \dots$

$$\omega = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{m_2^2} \right) \quad (4.13)$$

Serie de Humphreys (1952) en el infrarrojo $m_1 = 6$ y $m_2 = 7, 8, 9, \dots$

$$\omega = R \left(\frac{1}{6^2} - \frac{1}{m_2^2} \right) \quad (4.14)$$

De ésta manera estamos relacionando las líneas oscuras (y también las brillantes), con un modelo matemático que satisface la posición dentro de un registro. Para contractar experimentalmente las longitudes de onda calculadas, la serie de Balmer es la indicada para realizar estas mediciones en el visible. Ésta medición indica el comportamiento que sufren los gases al ser calentados mostrando así líneas brillantes (espectros de emisión),

o cuando aparecen líneas oscuras si este gas se pone delante de un emisor continuo más caliente (espectro de absorción), presentando un registro natural de líneas que es característico de cada elemento puesto a prueba. Si las líneas espectrales indican la naturaleza de la sustancia, entonces ¿cómo se relaciona con la estructura de la materia?. Es decir, debemos preguntarnos cómo se producen estas líneas. Para llegar a estas conclusiones, en el siguiente capítulo se mostrará cómo el concepto de átomo ha sufrido varias transformaciones hasta acoplarse a un modelo que se ajuste a nuestras necesidades, como es la relación entre la radiación y la materia.

5. Los átomos a través de los modelos y su descripción actual

En este capítulo se muestran los antecedentes históricos que formaron parte del cambio conceptual que se tenía sobre los átomos. Un punto crucial que se toma sobre la estructura de la materia es mostrar modelos que permitan asociar la experimentación con la teoría. Es por ello que se presentan varios modelos atómicos relacionados con la materia y la radiación.

Antiguamente los fenómenos eléctricos y los fenómenos magnéticos estaban separados. El profesor Hans Christian Oersted (1777-1851) en 1820, en una de sus clases encontró que la electricidad producía efectos magnéticos; quiere decir, que una corriente eléctrica es capaz de desviar una aguja imantada, ver [46]. Esta propiedad la aprovechó D'Arsonval para hacer un arreglo que es usado en los instrumentos de medida de corriente conocido como galvanómetro, Al año siguiente en 1821 Michael Faraday (1791-1867) demostró que un hilo por el que conduce corriente eléctrica puede girar en presencia de un imán, generando movimiento. En 1831 tanto Faraday como Henri encontraron un comportamiento conocido como la inducción electromagnética. En uno de los experimentos conectó un conductor enrollado a los extremos del galvanómetro. Luego movió un imán hacia adentro y hacia afuera, encontrándose movimiento de la aguja

del galvanómetro, en lo cual concluyó que el flujo de campo magnético variable indujo una fuerza electromotriz sobre la espira conductora [61]. Una aplicación de esta ley *ley de inducción* es el dínamo, o bien el alternador.

El mismo efecto generado se tiene si se deja quieto el imán y se mueve ahora la espira conductora a su alrededor. Ahora bien, estudios posteriores llevaron a tener dos espiras quietas (relativamente) en interacción, donde en una de ellas se aplica una corriente variable, encontrándose que en la otra espira el galvanómetro muestra que existe allí una corriente inducida. Su aplicación moderna es el transformador.

James Clerk Maxwell (1831-1879) investigó todas las leyes del comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos y su nexo con las cargas y corrientes eléctricas en un conjunto de ecuaciones que lleva su nombre. Para formularlas, tuvo en cuenta además en principio, el de la *conservación de la carga eléctrica*. Un aspecto muy interesante de las ecuaciones de Maxwell es que el vacío, es decir en ausencia de cargas y corrientes, pueden existir *ondas electromagnéticas*, las cuales son transversales y se propagan con la misma velocidad que la luz en el vacío.

Sin lugar a dudas el invento de la bomba de vacío en 1647 por Otto Von Guericke (1602- 1686)[58] fue uno de los cuatro inventos técnicos más grandes del siglo XVII al igual que el telescopio, microscopio y el reloj de péndulo. Un paso definitivo hacia el desarrollo de los tubos con descargas eléctricas fue dado por Francis Hawksbee (1666-1713)[1, 58] conocido como el viejo curador de experimentos y constructor de diferentes instrumentos de la real sociedad de Londres. Hawksbee observó un resplandor luminoso fosforescente en tubos al vacío cuando le agregaba unas gotas de mercurio y lo agitaba. Esta técnica de extraer el aire a los tubos fue mejorada por el alemán Heinrich W. Geissler (1815- 879)[1, 58] y además introducía dos electrodos; el ánodo y cátodo, a los cuales les aplicaba elevados voltajes por medio de un carrete de Ruhmkorff (una bobina

construida en 1851)[48], e introducía gases enrarecidos (gas a presión muy bajas, a una centésima de atmosfera) produciendo luminosidades de diversos colores según el tipo de gas.

Wilhelm Hittorf (1824-1914) y Eugen Goldstein (1850-1930)[1] en 1886, encontraron que al colocar un objeto en línea con el cátodo se presentaba una sombra bien definida. Esta sombra se producía por rayos que iban del cátodo hasta el ánodo, por lo que finalmente a ésta emisión Goldstein los llamo rayos catódicos.

El estudio sobre los tubos de rayos catódicos era el nuevo campo de investigación, el 8 de noviembre de 1895 Wilhelm Konrad Röntgen (1845-1923) encontró una nueva radiación [1]con la característica de poder atravesar los cuerpos opacos, pero al no saber su naturaleza los denominó rayos X. Ésta conclusión la halló trabajando con un tubo Cookes (tubo de rayos catódicos de forma esférica en la punta y alargado en el otro extremo donde se conectan los electrodos) envuelto completamente con papel negro sobre la mesa. Al lado estaba colocado un trazo de papel indicador de platinocianuro de bario, e hizo pasar a través del tubo una corriente eléctrica. Para sorpresa, se mostró una línea transversal sobre el papel, indicios de alguna emisión pero lo extraño es que el tubo estaba aislado [1].

El efecto observado fue tan impresionante que se le asocio dicha radiación a la luz solar, pero a su vez era imposible ya que el tubo estaba totalmente aislado por el papel que lo envolvía que no dejaba pasar luz alguna.

5.1. La naturaleza de los rayos X

Al experimentar con luz solar, la radiación electromagnética que engendra de ella se puede evidenciar los fenómenos de interferencia y polarización, mientras que los rayos X no. ¿Entonces qué son los rayos X?, ¿de dónde provienen? Estas y muchas más preguntas surgieron alrededor de la emisión de rayos X y su campo de estudio se amplió a muchas investigaciones. Un ejemplo de ello, es el caso de los experimentos de Henri Becquerel (1852-1908) [1] en 1903, quien encontró que las radiaciones emitidas por los compuestos de uranio entablaban armonía con las radiaciones emitidas por materiales fosforescentes y además agregaba que las radiaciones eran vibraciones armónicas de frecuencias altas, esto quiere decir que su emisión es de longitudes de onda pequeñas y por lo tanto tienen un gran poder de penetración como lo es el caso de los rayos X.

Estas conclusiones conllevan a plantear que dichas radiaciones pueden penetrar papel opaco a luz con la característica que esta emisión ionizaba los gases haciéndolos conductores. De esta forma el uranio es un metal que emite fosforescencia invisible a lo que Becquerel llamo la radiactividad.

5.2. ¿Qué es la radiactividad?

Este nuevo fenómeno llamado la radiactividad fue estudiado básicamente por Marie Sklodowska (1867-1934) y Pierre Curie (1859-1906) [1], quienes en 1898 descubrieron un nuevo elemento al que llamaron polonio y luego un material mucho más radiactivo que el uranio: el radio.

Para los Curie la emisión de rayos es una propiedad atómica de éstos elementos, así po-

demos confirmar que la cantidad de uranio depende la emisión, es una relación directa, entre más material más irá a emitir. Durante el proceso de emisión la conductividad del aire está presente ya que es afectado por la radiación, y de ésta manera, ellos concluyeron que los elementos más radiactivos son aquellos que tiene mayor peso atómico.

Las ideas que se plantearon sobre la radiactividad están basadas sobre dos concepciones; el primero de ellas está plasmado a la relación de las propiedades atómicas de la materia y el segundo sobre algún agente externo de la misma naturaleza [1]. Este desenvolvimiento de ideas se produjo en el lapso de tiempo entre 1903 hasta 1913 con un propósito fundamental que consistía en encontrar un modelo atómico que explicara la radiactividad y confirmara alguna concepción nombrada. Para ello se debe tener en cuenta los principios de individualidad de los elementos, la inmutabilidad de los átomos y la indestructibilidad de la materia, que son principios ya establecidos y aceptados.

Una de esas ideas fue planteada por Dmitri Ivanovitch Mendeleiev (1834-1907) [1], al asegurar que la propiedad atómica encargada de la radiactividad estaba basada en aquellos elementos más pesados como es el caso del uranio, torio y polonio, quiere decir, que solamente los átomos masivos son aquellos que producen la radiactividad y dado su peso estos átomos se podrían activar como soles que atraen a todos sus cuerpos de su alrededor ¹, como lo indica la ley de gravitación de Newton.

Otra propuesta para la explicación de la radiactividad es por medio de la hipótesis balística, donde indica que el radio emitiría de forma continua partículas extremadamente pequeñas cargadas de electricidad negativa, colisionando entre ellos y produciendo desprendimiento de energía.

El objetivo es claro, se debe encontrar algún modelo atómico que pueda explicar la

¹Modelo atómico planetario descrito por Mendeleiev

radiactividad, ya que la materia radiactiva sería un estado de movimiento interior violento, materia a punto de romperse [1], desprendiendo luz y calor, y su peso debería cambiar constantemente tardando miles de años en su desaparición.

5.3. Estructura de los rayos catódicos

En la emisión de rayos en los tubos catódicos sobresalen los trabajos de George Johnstone Stoney (1826-1911) [1] en 1894 quien intentó explicar que la electricidad era creada por unos corpúsculos a los que inicialmente llamó electrinos y más tarde electrones. Su argumentación se basó en la idea que existen descargas eléctricas entre moléculas de manera diferente produciendo las diferentes líneas espectrales observadas en los elementos. La fuente primordial de las líneas espectrales debe estar relacionada a partículas que transportan cargas eléctricas fijas como lo es el electrón.

Una de las características especiales que encontró Crookes en la observación de la emisión de rayos catódicos en presencia de un imán es que estos rayos son desviados y al colocar elementos opacos como la cruz de malta cuando se interponían en medio de dicha emisión produce sombra, ver [59]. Estos dos fenómenos conllevan a pensar que ésta emisión debe pertenecer a partículas diminutas o corpúsculos electrificados con carga negativa [59].

Estas ideas fueron argumentadas por Joseph John Thomson (1856-1940)[1, 2] quien sostiene que estos corpúsculos deben formar parte de los propios átomos, a los cuales llamó los subátomos.

En su experimento calcula la relación carga-masa de éstas partículas y encuentra que el cociente hallado es una constante para todos los gases. Este resultado está basado

en la siguiente relación:

$$\frac{\text{radiación catódica}}{\text{materia radiante}} = \text{corpúsculo} \quad \frac{q(\text{carga})}{m(\text{masa})} = e(\text{electrón}) \quad (5.1)$$

y su valor presentado es $\frac{e}{m} = 1,75882012 \times 10^{11} \frac{C}{Kg}$

Una forma concluyente de éstos resultados es indicar que los rayos catódicos son partículas o subátomos que viajan a gran velocidad, esto lleva a pensar que el tamaño de éstos portadores de carga deben ser pequeños comparado con el tamaño real del átomo.

Este valor presentado es muy pequeño comparado por la relación carga masa del átomo de hidrógeno que se conocía y se tomaba como referencia para la clasificación y análisis de los diferentes átomos estudiados, ya que se había postulado una ley en la cual se enunciaba que todos los elementos deberían ser múltiplos enteros del átomo de hidrógeno, tanto en peso como en electricidad.

Un componente conceptual que vale la pena resaltar en este momento histórico sobre la constitución de la materia es el modelo atómico de Dalton quien le atribuye propiedades de un cuerpo esférico compacto indivisible, cosa contraria a los que Thomson propone. Si estos subátomos están presentes en cualquier gas en donde se efectuó la descarga, podemos afirmar entonces que nos estamos refiriendo a una partícula elemental presente en todos los elementos de la naturaleza y componente universal de la materia [60].

Por lo tanto, la emisión de rayos catódicos forma cargas extremadamente pequeñas de electricidad negativa, estos viajan a través del espacio casi vacío del interior del tubo y muchos de ellos golpean el cristal de las paredes. Esta energía producida por los choques causa luminiscencia, siendo finalmente atraídos hacia el ánodo. Entonces, al analizar un gas por medio de su espectro, las líneas oscuras producidas no se deben

por las descargas sino en el repartidor de las cargas eléctricas. Estas cargas deben ser negativas ya que siempre se moviliza del cátodo al ánodo, cumpliendo con el principio de las cargas de Coulomb, y que finalmente Thomson en 1897 llama electrón [1].

En las descargas se produce una electrificación del gas cuando hay una ruptura de algunos átomos lo que produce la separación de partículas subatómicas o electrones, y cada uno de ellos transporta una unidad de carga elemental negativa, mientras que la parte del átomo que queda detrás deberá tener carga positiva y una masa grande comparada con el electrón ²[1].

Dentro de los resultados obtenidos por Thomson no pudo dar respuesta al valor de carga elemental, para ello Harold Albert Wilson (1874-1964) realizó una mejora a la técnica de condensación de gotas por Charles Wilson ³ (1869-1959) introduciendo campos eléctricos para aumentar o disminuir la velocidad de caída de las gotas cargadas [1]. Pero aun así se escapaban gotas de las cuales se cargaban con el aire ionizado perjudicando sus cálculos. Este valor de carga tuvo que esperar hasta el año de 1917 cuando Robert Andrews Millikan (1868 -1953)[1] se le ocurrió cambiar gotas de agua por gotas de aceite en la cámara de niebla, y utilizando la ley de Stoken que relaciona la caída de una gota a velocidad constante bajo la acción de la gravedad en presencia de la viscosidad del aire, y encontró la siguiente expresión:

$$q = \frac{(v_1 + v_2) 6\pi R\eta}{E} = 1,6022 \times 10^{-19} C \quad (5.2)$$

Donde q indica el valor de carga del electrón, v_1 y v_2 son las velocidades límite de la

² Modelo atómico de uvas pasas por Thomson

³Método de hacer visible, a través de la condensación del vapor, las trayectorias de partículas cargadas en su cámara de niebla

gota en descenso y ascenso en presencia del campo eléctrico, η es coeficiente de fricción entre la gota y el aire, R el radio de la gota y E el campo eléctrico. Este valor finalmente es el aceptado para la carga del electrón o carga elemental, ver [34, 35].

5.4. Sobre las radiaciones alfa, beta y gamma

El experimento de Rutherford consistía en dos placas de zinc, A y B, paralelas entre sí, A unida a una batería de 50 voltios conectada a tierra, mientras que B iba conectada a un electrómetro. Sobre A se depositaba polvo o compuesto de uranio metálico y siguiendo el procedimiento habitual de los rayos catódicos había un gas, la radiación emitida por el uranio ionizaba el gas y se establecía una corriente eléctrica entre A y B, que se detectaba en el electrómetro [1]. El siguiente paso era colocar sucesivas capas de uranio entre los electrodos A y B y estudiar como afectaban la intensidad de corriente, al aumentar el número de capas la intensidad de corriente disminuía, esto llevó a pensar que la radiación del uranio es compleja y que al menos están presentes dos tipos de radiación, una que es absorbida muy fácil (radiación alfa) y la otra de carácter más penetrante (radiación beta). Aunque la radiación gamma es 160 veces más penetrante que la beta fue detectada por el francés Paul Villard (1860-1934) en 1900 [1].

Villard al demostrar que los rayos catódicos no atravesaban placas metálicas, encontró que al lado opuesto de dicha placa existía radiación y no podía pertenecer a los electrones ya que no se desviaban en presencia de los rayos catódicos. Esta radiación era capaz de atravesar capas de cristal y plomo teniendo en cuenta que el plomo detiene la radiación beta. La frecuencia de la radiación gamma oscila entre 10^{-14} y los 10^{-14} metros, parecidos a los rayos X pero con mucho más energía [1].

En 1902 Rutherford encontró que el uranio, torio y el radio emitían estas tres radiaciones y teniendo en cuenta que los rayos alfa y gamma no son desviados por campos magnéticos mientras que los beta sí. Estas radiaciones disminuyen su intensidad en el tiempo cumpliendo una progresión geométrica dando lo que hoy se conoce como la ley de decaimiento.

La desintegración del átomo y la expulsión de partículas pesadas, con masa del mismo orden que el átomo de hidrógeno deja atrás un nuevo sistema más ligero que el anterior con propiedades químicas y físicas bastante diferentes del elemento original. Los fragmentos de átomos nuevos átomos que se producen del átomo inicial se les llamo metabolón y estaba enfocado a la desintegración del uranio, torio y radio [1].

De las radiaciones emitidas los rayos beta son electrones que se mueven a gran velocidad, mientras que las partículas alfa poseen una masa mucho mayor que los electrones, están constituidas por materia. Johannes (Hans) Wilhelm Geiger (1882 - 1945) determinó que la partícula alfa transporta una carga equivalente a dos electrones, por lo tanto es un átomo de helio o es un núcleo de átomo de helio [7].

Para contar partículas alfas con un método directo construyeron un contador de partículas, por medio del centelleo mediante pantallas de sulfuro de zinc fosforescente, y se podían contar el número de destellos que aparecían por segundos en una pantalla (dependía del observador).

Rutherford y Geiger fueron capaces de contar $3,4 \times 10^{10}$ partículas de alfa en un gramo de uranio midiendo la carga total emitida a través de la radiación alfa por una muestra de radio [1].

5.5. Modelo nuclear del átomo

La idea de cómo es la estructura interna de la materia se basaba a la experimentación de Geiger y Marsden, que consistía en bombardear una fina lámina de oro con partículas alfa (núcleos de helio). Rutherford comprobó que algunas partículas alfa se desviaban en ángulos superiores a los ángulos rectos, y estos podían ser explicados como consecuencia de encuentros de partículas alfa con átomos o moléculas del metal que formaban la lámina [1, 14].

Sin embargo la teoría de Thomson se basa en la suposición de que la difusión (propagación) debida a un único encuentro atómico es pequeña, su modelo atómico no admite una desviación muy grande de una partícula alfa al atravesar un solo átomo, salvo que se suponga que el diámetro de la esfera de electricidad positiva es diminuto comparado con el diámetro de la esfera del átomo.

Estas partículas cargadas o electrones distribuida en forma de corpúsculos se mueven a gran velocidad con un radio constante R alrededor de un centro donde está concentrado la carga positiva, y considerando el principio de las cargas basado en la ley de Coulomb las partículas alfa y el centro atómico sufrirían una repulsión eléctrica por tratarse de cargas positivas iguales. Para ello Rutherford consideró que ese núcleo positivo estaba concentrado en unos 10^{-8} cm y rodeados de una esfera de corpúsculos cargados que giran alrededor de él de aproximadamente 10^{-12} cm de radio [1, 64]. El hecho de que el núcleo tenga un diámetro unas diez mil veces menor que el átomo supone una gran cantidad de espacio vacío en la organización atómica de la materia.

El modelo atómico de Rutherford es clásico ya que al considerar el núcleo atómico masivo respecto a los electrones, se podía considerar un modelo planetario cumpliendo con las leyes de Newtonianas que rigen también el sistema solar. Rutherford no considera la

estabilidad del átomo ya que según el electromagnetismo de Maxwell implica que toda partícula cargada al ser acelerada u oscilante debe radiar energía en forma de ondas electromagnéticas, por ende la energía del electrón debería disminuir en forma continua contrayéndose su trayectoria cada vez más formando un espiral que terminaría en el núcleo atómico [14].

5.6. La armonía de los espectros y de la materia

Uno de los trabajos más importantes que quiso demostrar Niels Henrik David Bohr (1885-1962) [1, 24] fue la dispersión de la luz y absorción de las partículas alfas, trabajo que le llevó a pensar en la inestabilidad del sistema o del modelo atómico planteado por Rutherford. Éste trabajo es encaminado no tanto por la inestabilidad electromagnética referente a la emisión de radiación por partículas cargadas, sino por la inestabilidad mecánica de los anillos donde se alojaban los electrones, ya que al tener la misma carga éstos se repelen entre sí surgiendo un modo de oscilación que crecía hasta destruir el átomo [14]. Para estabilizar este sistema se debería adoptar un elemento no mecánico como son los cuantos de Planck.

Inspirado en el modelo atómico de Rutherford John William Nicholson (1881-1955), quería explicar las líneas espectrales producidas por algunas nebulosas, ya que suponía el origen a estas líneas son por las oscilaciones generadas por los electrones en la dirección perpendicular al plano en el que se mueven a velocidades más bajas respecto a la luz [1]. Para ello debería introducir el momento angular del electrón como el múltiplo entero de la expresión $\frac{h}{2\pi}$ ⁴ para justificar las series de líneas observadas en los espectros y sugerir que los átomos presentes han cambiado su momento angular por

⁴h es la constante de Planck

valores discretos, pero mantenían sus estados atómicos excitados.

Para Bohr la motivación esencial en el planteamiento de las ideas de Nicholson está basada en la química del elemento a estudiar y no en sus datos espectroscópicos. Al tomar el hidrógeno como elemento de análisis, consideró que su núcleo está formado por una carga positiva en su centro y su electrón giraba alrededor de él describiendo una trayectoria elíptica, ya que si éste electrón rotaba con una determinada frecuencia según las leyes de la electrostática, describiría una órbita estacionaria alrededor del núcleo [1]. Empleando la fuerza eléctrica de Coulomb y apropiándose de conceptos como el movimiento circular uniforme y la conservación de la energía e incluyendo los cuantos de Planck llegó a mejorar el modelo planetario del átomo.

Dentro de las cuestiones que Bohr supuso para establecer la radiación emitida por el electrón en cada órbita, fue la de relacionar la radiación emitida de su frecuencia de valor ω a la mitad de la frecuencia de revolución de cada órbita, llegando así a la expresión de Planck $E = h\nu$. Esta manera las orbitas no podían aumentar ni disminuir de manera gradual, sino en forma discontinua donde la relación de las longitudes de onda de los espectros favorecen al cociente entre la energía del sistema y la frecuencia de rotación que debe ser un múltiplo entero de la constante de Planck y que se debe a la radiación emitida en líneas del espectro, identificada con la frecuencia de vibración de un sistema mecánico, ó sea que la radiación será emitida en formas de paquetes de energía llamados cuantos.

La serie de Balmer es un hecho empírico que se puede demostrar experimentalmente y concuerda perfectamente, es ésta, la principal razón de establecer relaciones entre un modelo como una formalización teórica. Los anteriores modelos no concluían a la demostración de dicha serie y por lo tanto se debería encontrar ese vínculo que exigía tal modelo. Este vínculo conllevó a los inicios de mecánica cuántica.

Retomando el modelo de Rutherford se encuentra que la estabilidad de la materia emana radiación constantemente, hecho que experimentalmente no concuerda. Para solucionar este percance, se pensó en utilizar las órbitas del modelo planetario como órbitas estacionarias, de las cuales sólo pueden tener un valor fijo de energía y estas dependían de lo cerca o lejos que estuviesen del núcleo atómico. Para ello se implementó la Cuantización de la energía, que da cuenta de los diferentes valores de energía de las órbitas estacionarias. Esta cantidad ajena a las leyes de la electrodinámica clásica es precisamente la constante de Planck [1]. En principio, la aplicación de esta constante es insinuar que el electrón está orbitando con una frecuencia ω y por lo tanto describe una órbita estacionaria ⁵, de esta forma nos encontraremos con energías continuas donde se soluciona el problema de la inestabilidad de la materia.

Estas órbitas estacionarias son como anillos alrededor del núcleo, cada órbita tiene un valor de energía determinado y en esa región los electrones que habitan en él están acelerados sin irradiar energía. Si el átomo está en equilibrio eléctrico y es excitado, los electrones que habitan en esas órbitas estacionarias sufren una transición entre las demás órbitas, para llegar a realizar dichas transiciones, el electrón debe hacer un salto cuántico el cual involucra una emisión o absorción de energía. Esta manera de pensar, relaciona estrechamente la serie de Balmer y más exactamente al principio de combinación de Ritz, donde podemos suponer que las transiciones efectuadas dependen de la diferencia entre términos espectrales. Entonces el modelo de Bohr se interpreta como un estado cuántico al introducir valores específicos de energía, además se indica que la fuerza eléctrica de Coulomb es equivalente a la fuerza centrípeta, para ello se [3]: Bohr sabía que la energía de un fotón era igual a la constante de Planck multiplicada por su frecuencia. Si el modelo de Bohr estaba correcto, también sabía que la energía de un fotón emitido era igual a la diferencia entre los niveles superior e inferior de

⁵Primer postulado de Bohr

energía involucrados en el proceso. Así que tenía una relación entre niveles de energía y las frecuencias de los fotones.

Pero la fórmula de Balmer especificaba la longitud de onda y no la frecuencia. De la relación:

Entonces, si:

$$f = \frac{c}{\lambda} \tag{5.3}$$

tenemos:

$$f\lambda = c \tag{5.4}$$

tomando el postulado de Planck

$$E_{final} - E_{inicial} = hf \tag{5.5}$$

se deduce que:

$$\frac{1}{hc} (E_{final} - E_{inicial}) = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \tag{5.6}$$

a partir de la fórmula de Balmer:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \tag{5.7}$$

Y dado que:

$$\Delta E = hf \tag{5.8}$$

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda} \quad (5.9)$$

$$\frac{\Delta E}{hc} = \frac{1}{\lambda} \quad (5.10)$$

Ahora, podemos describir los niveles de energía en términos de la energía cinética y potencial de los electrones:

$$\Delta E = \frac{1}{2}m(v_f^2 - v_i^2) - Ke^2 \left(\frac{1}{r_f} - \frac{1}{r_i} \right) \quad (5.11)$$

donde m es la masa del electrón, y v y r son su velocidad y el radio orbital en los niveles superior e inferior.

Si el electrón está en una órbita circular, entonces se puede introducir el momento angular como:

$$L = mvr \quad (5.12)$$

despejando la velocidad, tenemos:

$$v = \frac{L}{mr} \quad (5.13)$$

De modo que ahora se puede escribir todo en términos de r y L :

$$\Delta E = \frac{L}{2m} \left(\frac{1}{r_f^2} - \frac{1}{r_i^2} \right) - Ke^2 \left(\frac{1}{r_f} - \frac{1}{r_i} \right) \quad (5.14)$$

Para encontrar el valor de r , podemos aplicar la segunda Ley de Newton, $F=ma$, al electrón. La fuerza sobre el electrón se puede hallar aplicando la Ley de Coulomb:

$$F = \frac{Ke^2}{r^2} \quad (5.15)$$

Si el electrón se encuentra en un movimiento circular uniforme, su aceleración es

$$a = \frac{v^2}{r} \quad (5.16)$$

igualando la fuerza de Coulomb y de la Newton tenemos:

$$\frac{Ke^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad (5.17)$$

Sustituyendo el valor para v que se obtuvo en la ecuación(12) y resolviendo para r , encontramos que

$$r = \frac{L^2}{Kme^2} \quad (5.18)$$

Con todo en términos de L , obtenemos una ecuación más manejable

$$\Delta E = \frac{K^2e^4m}{2} \left(\frac{1}{L_f^2} - \frac{1}{L_i^2} \right) \quad (5.19)$$

lo que significa, a partir de la ecuación (5), que:

$$\frac{K^2e^4m}{2hc} \left(\frac{1}{L_f^2} - \frac{1}{L_i^2} \right) = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (5.20)$$

La lógica de Bohr fue asumir los términos al cuadrado en la parte derecha y que debían estar relacionados con su idea de niveles de energía. El asoció cada nivel de energía con un entero, llamado n o número principal, con $n = 1$ correspondiendo al nivel inicial (el más bajo nivel posible de energía). Así el 2 y el n ésimo término de la serie de Balmer podía representar electrones cayendo del n ésimo nivel al segundo y así sucesivamente.

Entonces él asumió simplemente que el momento angular en el n ésimo nivel de energía era igual a n veces alguna constante. Para hallar la constante, todo lo que tenía que hacer era hallar el valor que hiciera verdadera la ecuación(19). Y el valor que funciona es:

$$L = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar \quad (5.21)$$

esto implica

$$R = \frac{2\pi^2 K^2 e^4 m}{ch^3} \quad (5.22)$$

Si se introducen los valores de todas las constantes fundamentales como la velocidad de la luz, la carga y masa del electrón, constante de Planck y la constante de Coulomb, se termina con el valor de la Constante de Rydberg que había sido obtenido experimentalmente.

En las situaciones observacionales de Bohr, no son coherentes, aparecen desdoblamientos de las líneas espectrales que se presentan como dobletes, tripletes, cuartetos, quintetos. Pero la intención de este trabajo no es dar cuenta de este modelo. Lo importante es que Bohr aportó un conjunto de ideas, que dan cuenta una relación directa entre estados estacionarios para explicar las líneas espectrales de Balmer y que se asocian entre

transiciones con las órbitas estacionarias puesto que estas ideas de órbita estacionaria sólo sirven para el caso del hidrógeno y elementos hidrogenoides.

6. Desarrollo de la unidad didáctica

En la actualidad en el COLEGIO CLARETIANO DE BOSA, la tendencia pedagógica en la que se fundamenta el trabajo en ciencias naturales es, la enseñanza para la comprensión, y durante dos años la he seguido y adaptado para mi planeación de clase, es por eso que quiero hacer hincapié sobre la forma que se lleva a cabo la aplicación de éste recurso pedagógico en mi quehacer como docente de física.

La enseñanza para la comprensión consta de cuatro pasos; los tópicos generativos, metas de comprensión, desempeños de comprensión y la evaluación diagnóstica continua según lo explica Tina Blythe [63] que, en éste momento es la bibliografía utilizada por el área de ciencias naturales en la institución educativa y es la base del desarrollo de nuestras unidades didácticas correspondientes a los periodos en que se divide el año escolar.

Las características fundamentales del docente que busca desarrollar procesos eficientes de enseñanza aprendizaje están enmarcadas en su labor como: mediador entre la ciencia formal y las expectativas de los estudiantes, ser promotor de capacidad de asombro frente al desarrollo de los conceptos a través de la historia; ser potencializado del manejo adecuado del lenguaje científico y además motivador hacia el aprendizaje y la investigación. En este orden de ideas la Enseñanza para la comprensión es vista como una herramienta eficaz que utiliza el área de ciencias naturales para lograr los objetivos

referidos.

Un factor que se reconoce del marco teórico en el momento de iniciar el proceso de enseñanza aprendizaje, es la interacción que se puede llevar con los estudiantes sobre un tema determinado como una especie de sondeo sobre los preconceptos que ellos tienen y que han sido contruidos por diferentes medios. Algunos de estos saberes son muy apropiados en la determinación de cierta situación y otros no, pues son erróneos o en algunos casos cuentan con poca argumentación. Este sondeo preliminar es una excusa que se puede adoptar para clasificar cuales son los tópicos que vale la pena profundizar para ser comprendidos. De esta manera se quiere fomentar la comprensión por medio de la investigación sobre lo que ellos realmente quieren aprender y los motiva a comprender sin obligar o utilizar otros recursos que no son los más apropiados en este proceso enseñanza aprendizaje.

Gracias a este preámbulo, podemos elaborar la unidad didáctica y la planeación por periodos atendiendo las sugerencias de los estudiantes [63], es decir: la exploración de intereses y experiencias del tema determinado; crear el hilo conductor que encierre y satisfaga las expectativas de los estudiantes. Proponer actividades planeadas para el proceso de comprensión que deben ser estructuras, que faciliten la evaluación continua y que permitan visualizar su nivel de retroalimentación respecto al tema, lo que permite una atención más personalizada a los intereses de cada estudiante ya que se puede evidenciar el proceso que día tras día éste va generando en su ámbito académico. Cabe anotar que el éxito de esta experiencia depende en buena parte de la formación científica, humana y pedagógica inherente al docente, pues es este quien proyecta sobre su grupo de estudiantes las posibles perspectivas académicas, sociales y aquellas que permitan construir su proyecto de vida, por lo tanto la claridad que éste tenga de sus objetivos y métodos debe estar mediada necesariamente por una planeación previa y

cuidadosa de las actividades a desarrollar y las expectativas que estas encierran, de esto depende que su información y experimentación en el aula sea acertada

En este caso expondré mi caso particular sobre como el desarrollo de mi propuesta pedagógica con un curso piloto, al que se invitó a los estudiantes del colegio Claretiano de Bosa jornada tarde a asistir de forma voluntaria a clases extra en horas de la mañana para la aplicación de la presente unidad didáctica.

HILO CONDUCTOR: ¿Cómo se relaciona la radiación y la materia?

TÓPICOS GENERATIVOS: ¿Cómo se relaciona el campo eléctrico y el campo magnético?, ¿Cuáles son las leyes que rigen el campo eléctrico y magnético? ¿Cómo se descubrió el electrón?, ¿Cómo se descubrió el núcleo atómico? ¿Qué es la espectroscopia?, ¿Cómo se relaciona la radiación y la materia?

EJES TEMÁTICOS

1. La luz como onda
2. Concepto de materia a través de la historia
3. Historia de la electricidad y magnetismo
4. Leyes que rigen la electricidad
5. Leyes que el magnetismo
6. Tubos de rayos catódicos y descubrimiento del electrón
7. La radiactividad y el decaimiento de partículas alfa

8. Radiación de cuerpo negro y modelos atómicos

9. Historia de la espectroscopia

OBJETIVO GENERAL

Implementar una unidad didáctica para el grado once para llegar a la estructura cuántica del átomo (de un modo elemental) a partir de experiencias y análisis de experimentos espectroscópicos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar prácticas experimentales de espectroscopia para entrelazarlas con las teorías físicas y su enseñanza.

METAS DE COMPRENSIÓN

- Comprenderá la conexión de conceptos preliminares de la estructura de la materia y los modelos atómicos por medio de prácticas experimentales de espectroscopia.
- Observará por medio de un espectroscopio y/o prismas los espectros característicos de diferentes sustancias.
- Organizará algunos elementos por medio de los espectros que sea posible observar con el espectroscopio.
- Realizará diferentes montajes experimentales que lleven a la comprensión de campo eléctrico, campo magnético y fenómenos ondulatorios
- Utilizará espectroscopios para observar los espectros de distintos elementos que emiten luz, así como la observación de la luz difusa de día, caracterizándolos

con respecto a la forma en que se ven y en qué orden se muestran las distintas gammas de colores.

HABILIDADES DE PENSAMIENTO

- Interpretar
- Analizar
- Argumentar
- Proponer
- Plantear problemas

RECURSOS

Además del tablero y el marcador también vale la pena resaltar las ayudas proporcionadas por internet, como es el caso de Youtube, ya que podemos presentar videos interactivos que facilitan la comprensión del tema, como por ejemplo, cuando no contamos con instrumentos adecuados para la realización de una práctica experimental requerida para tal fin. En nuestro caso, se presentaron varios videos que apoyaron las diferentes sesiones, como fue la evidencia de campo eléctrico, el carrete de Ruhmkorff, tubos de rayos catódicos, entre otros. Otro recurso utilizado es el uso de video beam para proyectar las presentaciones estipuladas por la unidad didáctica.

DESEMPEÑOS DE COMPRESIÓN

COMPETENCIAS: aprender a ser, aprender a conocer, aprender a hacer, aprender a convivir.

FASE DE EXPLORACIÓN

Para esta fase inicial, se hizo la presentación de la unidad didáctica, aclarando los objetivos propuestos para el desarrollo de las nueve sesiones en que esta dividida. Se realizó una lluvia de ideas con ayuda de los tópicos generativos como parte de la motivación del grupo, y luego se prosedió a mostrar por medio de diapositivas los diferentes fenómenos ondulatorios que se pueden evidenciar al tratar la luz como una onda. Estos fenómenos están relacionados a la reflexión, refracción, difracción, interferencia y polarización. Al tratarse la luz como una onda, se propuso iniciar el tema con la ley de Hooke y el movimiento armónico simple ya que éste nos proporciona gran información teórica que muestra el tratamiento matemático de su análisis. Luego se mostraron algunas experiencias cotidianas donde se pueden evidenciar los fenómenos ópticos de la luz.

INVESTIGACIÓN GUIADA

Por medio de presentaciones de power point (B) en video beam se muestra la historia de los estudios relacionados de la electricidad y el magnetismo ¹, después se realiza prácticas experimentales sobre fuerza eléctrica apoyada por un electroscopio [20, 21]. Luego se muestra experimentalmente las leyes que muestran la interacción del campo eléctrico y magnético y el surgimiento del electromagnetismo como una nueva ciencia de estudio en el siglo XIX

Estos estudios conllevan a la aparición de nuevos instrumentos como son los generadores de corriente alterna utilizados en la experimentación con tubos de vacío al conectarse dos electrodos. Este tipo de experimentación ofreció un gran interés por la fosforescencia que aparecía en él cuando se le inyecta gases enrarecidos y se agitaban. Un desarrollo técnico en la elaboración de estos tubos son los tubos de Crooker ².

¹Capítulo tres

²Capítulo cinco

La chispa producida por los generadores en el tubo Crooker adoptan el nombre de tubos de rayos catódicos por su emisión de partículas que se desplazan del cátodo al ánodo. El estudio de la naturaleza de éstos rayos llegó al descubrimiento de los rayos X y la radiactividad, cuestión que dio pie para encontrar un modelo explicativo de cómo era la estructura interna de la materia. Para ello se presenta el desarrollo de los modelos atómicos de Thomson y Rutherford, mostrando sus progresos y dificultades teóricas y experimentales que se incluían en cada prototipo expuesto. Por otro lado, se muestra la evolución, obtención y desarrollo de los espectros, desde Newton hasta comienzos del siglo XX con Rydberg ³. Un momento crucial en el desenvolvimiento de la ciencia es la creación de un modelo atómico que integre la estructura interna de la materia con los espectros observados en diferentes sustancias. Este gran paso fue logrado por Bohr, quien fue el promotor de un modelo atómico donde revela la estabilidad de la materia y justifica la discontinuidad de la energía por medio del empleo de la mecánica clásica y los postulados de Planck. Al igual que los anteriores modelos atómicos, también presenta fallas en la descripción para átomos diferentes al hidrógeno. Lo que vale resaltar en éste modelo, es el cambio conceptual que adopta dando pie a nuevas pautas investigativas entre la radiación y la materia.

PROYECTO FINAL DE SINTESIS

Para ésta parte final de la unidad didáctica, se dividió en dos partes. Una de ellas es la experimentación con un espectroscopio casero hecho con un CD [19, 62], de sustancias de fácil adquisición y al quemarlas se puede observar las diferentes líneas espectrales que emiten, y se pueden relacionar con las teorizaciones que se expusieron con anterioridad. La otra parte es el cierre de la unidad didáctica. Este cierre consta de una guía final [64] donde los estudiantes contestaran diferentes preguntas basadas en las clases anteriores.

³Capítulo cuatro

Esta actividad se realiza con aras de percibir el nivel de aceptación del tema desarrollado en las presentes nueve sesiones propuestas por ésta unidad didáctica.

Los pasos que se siguieron en la presente propuesta didáctica los podemos encontrar en (B)

7. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se presentó el desarrollo, evolución y experimentación de algunos de los conceptos que permiten comprender la relación que existe entre radiación y materia. El objetivo ha sido resaltar los hechos históricos que más han contribuido al estudio de la electricidad, magnetismo, modelos atómicos y la espectroscopia, tanto en su contexto teórico como experimental. Para ello se tomó un estilo no tradicionalista de llevar una secuencia implementada por una unidad didáctica a un grupo llamado curso piloto del grado once del Colegio Claretiano de Bosa.

Esta forma de abordar las nueve sesiones en que se dividió la unidad didáctica, se utilizaron recursos como el tablero, marcadores, un video beam, computador, conexión a internet y diferentes aparatos para realizar prácticas experimentales.

Realizando un análisis de los efectos causados al finalizar el curso por los estudiantes durante éste lapso de tiempo tenemos:

- Se puede evidenciar que los estudiantes llegaron a una mejor comprensión de los conceptos relacionados en la propuesta didáctica al realizar experimentos sobre campo magnético y campos eléctricos. La motivación y curiosidad de evidenciar diferentes líneas espectrales es cada uno de los elementos mencionados en la unidad didáctica, animó a realizar un espectroscopio casero para observar el fas-

cinante mundo de los colores producidos por los espectros y la comprensión de la naturaleza de las líneas oscuras y brillantes, características de cada sustancia.

- Se muestra gran acogida por los estudiante al desarrollo de la clase, ya que no se torna monótona, al contrario es dinámica y se integra en cada sesión la parte histórica, teórica y experimental del tema centrado.
- Se enfatizó a resaltar las primeras conceptualizaciones que el hombre ha creado en su afán de describir los fenómenos de electrización y magnetismo, mostrando los hechos más sobresalientes que fueron apareciendo a través de la historia, a los cuales se llegó a su matematización, para luego convertirse en teorías demostradas y afirmadas mediante la reproducción de experimentos en el laboratorio, como es el caso del experimento de Oesrted y Ampere, de Faraday, Coulomb y campos magnéticos.
- La elaboración de instrumentos de prácticas de laboratorio de bajo costo, es un buen recurso para realizar prácticas de laboratorio, además que los estudiantes poseen destrezas en ésta fabricación, elemento que se puede aprovechar.
- La manipulación de diferentes instrumentos utilizados en las prácticas experimentales, tienen gran acogida por parte de los estudiantes, ya que el impacto generado por estos fenómenos induce a pensar la manera de combinar la teoría con lo que observan.
- En los experimentos de espectroscopia centró a los estudiantes a la observación de las líneas que aparecen en dicho espectro, determinando en primera instancia la búsqueda de las líneas D (doble línea amarilla) en cada una de las experiencias, determinando si ésta sustancia contiene o no sodio.

A. Fotos

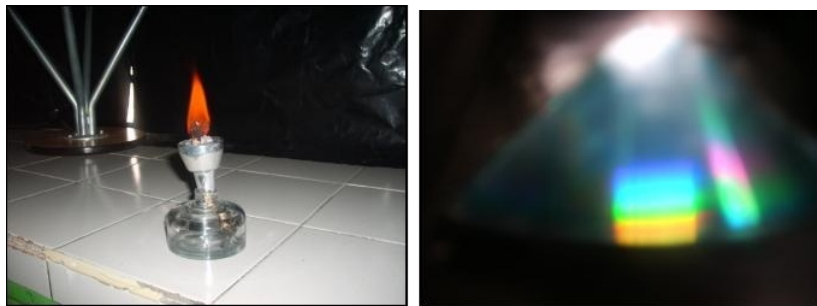


Figura A.1.: Cambio de color de la flama al rociar sal común y su espectro respectivo

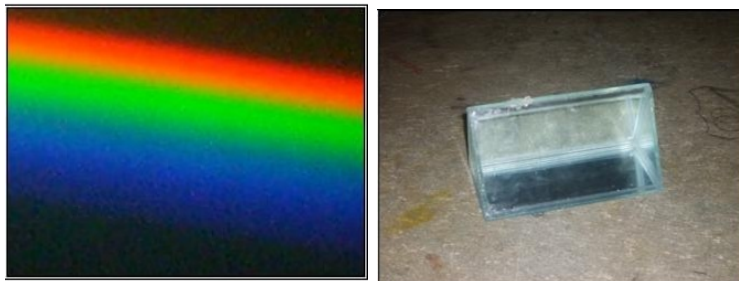


Figura A.2.: Observación del espectro del sol y la presencia de líneas negras



Figura A.5.: Observación de campos magnéticos

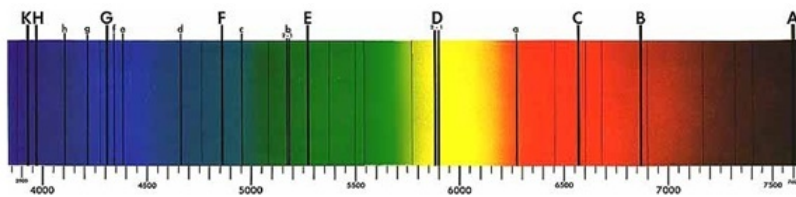


Figura A.3.: Localización de líneas negras en el espectro solar por Fraunhofer [28]



Figura A.4.: Electroscopio



Figura A.6.: Tubos de vacío

B. Desarrollo de la unidad didáctica

La unidad didáctica se desarrolló en nueve sesiones estructuradas de la siguiente manera:

B.1. Sesión uno: La luz como onda [38]

Objetivo: Identificar y analizar los diferentes fenómenos asociados a la luz

Metodología

Se realizó una presentación de power point mostrando el movimiento armónico simple como punto de partida en la descripción de las ondas. Luego se explicaron la reflexión como el cambio de dirección de una onda cuando incide sobre una superficie, como por ejemplo al apuntar un láser sobre un espejo. La refracción de la luz que se presenta cuando la luz pasa de un medio a otro cambiando de velocidad, para ello se tomó un vaso de agua y se introdujo un lápiz en él, y se logró evidenciar un cambio en la contextura del lápiz que es proporcionado por la luz.

Cuando la onda pasa a través de un hueco, éste se convierte como un nuevo punto generador de ondas conservando todas sus propiedades, como su periodo, su frecuencia,

su velocidad y longitud de onda. Estas nuevas ondas tienen la característica de ser ondas esféricas y se le conoce como el principio de Huygens, base primordial en la explicación del fenómeno de la difracción. De la misma manera cuando dos o más ondas inciden podemos observar el fenómeno por medio de una rendija fabricada por el enfrentamiento de dos cuchillas de afeitar "minora". Cuando observamos una fuente de luz como un bombillo a través de ésta rendija podemos apreciar líneas oscuras y brillantes causante de la interferencia constructiva y destructiva de las ondas.

Además se mostraron imágenes que se forman a causa de la difracción de la luz por medio de un círculo y un cuadrado, para terminar se mostró un video del profesor cuántum [30] sobre el experimento de doble rendija y otro sobre las diferentes escalas entre lo pequeño y lo grande.

B.2. Sesión dos: Desarrollo conceptual del campo eléctrico y campo magnético [39]

Objetivo: Describir los hechos más representativos a través de la historia que han originado el estudio de la electricidad y el magnetismo.

Metodología

Por medio de presentaciones en power point se hizo un recorrido histórico de la electricidad y por otra parte del magnetismo, para finalizar con la unión de estos dos campos que estudia a lo que actualmente se le conoce como electromagnetismo.

En esta sesión se realizó un experimento sencillo pero muy interactivo. Consistió en observar la presencia de las líneas de campo magnético generadas por uno y varios

imanes con limadura de hierro, en esta observación se pueden evidenciar la atracción y la repulsión de los polos de los imanes presentes, ver(A).

Para la observación de campos eléctricos generados por cargas puntuales se utilizó un video, [31] ya que no se contaba con los materiales necesarios para esta práctica.

B.3. Sesión tres: Leyes que rigen la electricidad y el magnetismo [40]

Objetivo: Realizar diferentes prácticas experimentales donde se evidencie los hechos teóricos más representativos en el estudio del electromagnetismo.

Metodología

Para esta sesión los estudiantes llevaron diferentes elementos como un frasco de vidrio con tapa plástica, alambre, papel de aluminio, bombas, peine, bolas de icopor, un trozo de lana y un trazo de seda.

Con estos materiales se realizó un electroscopio para evidenciar el principio de las cargas y además para comprobar que la materia tiene composición eléctrica [20, 21], ver (A).

Otro experimento que se utilizó, fue reproducir la experiencia que tuvo Oersted con un circuito eléctrico al cual se le conectó una bobina elaborada con una puntilla y aislamiento de cobre enrollado y al lado una brújula construida con un imán e icopor para que éste flotara sobre un recipiente con agua. En ésta práctica se evidencia la torsión de la brújula generada por un campo eléctrico presente; como conclusión se

puede afirmar que el campo eléctrico genera un campo magnético a su alrededor, ver [46].

Al conectar una bobina a un micro amperímetro y mover paralelamente un imán por encima de ésta bobina se evidencia la producción de corriente eléctrica al observar el movimiento de la aguja del aparato de medición, ver [47]. Con este experimento se complementa la relación que tiene el campo magnético en la generación de corriente eléctrica y viceversa formándose la nueva rama de investigación física llamada electromagnetismo establecida por Maxwell.

Para finalizar la exposición de ésta sesión se toma como referencia la aplicación que tiene el electromagnetismo en las pantallas de televisión y su avance científico en la producción de artefactos de uso común, mostrando los antiguos diodos, tetrodos y pentodos que se utilizaban en los televisores a blanco y negro. Aquellos tubos funcionan por un principio llamado la emisión termoeléctrica, ver (A).

B.4. sesión cuatro: Incidencia entre campos eléctricos y campos magnéticos [41]

Objetivo: Identificar y analizar matemáticamente las leyes que rigen el electromagnetismo.

Metodología

En esta sesión se mostró la teorización empleada en la explicación de las leyes que rigen el electromagnetismo y que fueron evidenciadas en la sesión anterior. Para ello se muestra la postulación de la fuerza eléctrica de Coulomb creada por dos cargas, campo

eléctrico generado por una carga puntual. Cuando las cargas están en movimiento podemos utilizar la ley de Ampere en un circuito, la ley de Faraday de inducción y modelos vectoriales que explican el movimiento de cargas eléctricas en presencia de campos magnéticos como es la ley de Biot y Savart.

B.5. Sesión cinco: El tubo de rayos catódicos y el descubrimiento del electrón [42]

Objetivo: Mostrar el campo de investigación generado por los tubos de rayos catódicos y su incidencia en el descubrimiento del electrón.

Metodología

La presentación de esta sesión está dedicada a resaltar uno de los cuatro inventos más sobresalientes en el siglo XVII como es la bomba de vacío creada por Otto von Guericke. Para ello se muestra el experimento de Magderburgo [32] que consiste en dos hemisferios unido de sus extremos por simple contacto y luego se le extraerle todo el aire en su interior (condición de vacío), no era capaz de separarlo 16 caballos (ocho a cada lado) halando a la vez.

También se muestra la evolución que sufrió los tubos al vacío cuando le inyectaban gases enrarecidos y/o mercurio [1]. Por otra parte la modificación de su envase hasta el punto donde le incluyeron dos electrodos (un positivo y el otro negativo). El estudio de la emisión de estos rayos prosiguió con el descubrimiento de los rayos X y su aplicación al campo de la medicina ¹. En esta misma línea de investigaciones utilizaron los mismos

¹Para observar el funcionamiento de los rayos X, ver [49]

tubos al vacío con sus electrodos pero en esta ocasión le incluyeron la cruz de malta.

Para evidenciar dicha emisión de rayos catódicos y presenciar la sombra generada sobre la cruz de malta y al notar que ésta se mueve si le acercamos un imán, se utiliza un video interactivo [59]. Estas investigaciones fueron realizadas especialmente por JJ Thomson al explicar la naturaleza de los rayos catódicos. El punto crucial de esta búsqueda se representa en la emisión de partículas subatómicas de carga negativa que se trasladan del cátodo al ánodo, y teniendo en cuenta la velocidad con la que viajan estas partículas, se puede considerar que la parte positiva del átomo no se mueve, razón por la cual ideó un modelo que se acople a ésta idea imaginando una masa de carga positiva con incrustaciones de carga negativa listas a dejar su punto de reposo.

La relación carga masa realizada por Thomson no daba a conocer el valor exacto de la carga elemental, Millikan por medio de su experimento de la gota de aceite encontró dicho valor y se muestra el procedimiento por medio de un video [34, 35].

B.6. Sesión seis: Radiactividad y modelo atómico de Rutherford [42]

Objetivo: Reconocer la importancia del estudio de la radiactividad y la desintegración de partículas como una nueva forma de radiación que conllevó al modelo nuclear del átomo.

Metodología

Para esta presentación se resalta los trabajos de Becquerel sobre radiactividad, describiendo los sucesos más importantes de su descubrimiento como fue la emisión de

energía de algunos elementos como el uranio. Otra contribución valiosa fue realizada por los Curie al descubrir dos elementos más radiactivos que el uranio; el radio y el polonio.

El campo de acción consistía en determinar aquellas radiaciones que se detectaban en algunas regiones del experimento de Geiger y Rutherford [36] y en el estudio de las trayectorias de dichas partículas en las que, según el modelo de Thomson no justificaba el modelo propuesto por él, ya que al bombardear una lámina de oro se presenciaba que dicha partícula atravesaba directamente la lámina, en ocasiones se desviaba y en otras rebotaba. Para solucionar el problema Rutherford se imagina que el átomo es vacío, con partículas negativas girando alrededor una masa central positiva y que según las leyes de la física clásica, se comportaría como un sistema planetario diminuto. Además encontró el tamaño del átomo y de su núcleo atómico determinando así su modelo. Según su experimento las partículas detectadas son positivas pertenecientes a núcleos de Helio a las que se llaman partículas alfa, a la emisión de partículas negativas o electrones se les conoce como emisión beta y a la radiación gamma como ondas electromagnéticas.

El modelo de Rutherford tiene muchos problemas conceptuales visto desde la mecánica y electromagnetismo clásico, razón por la que se debe cambiar de modelo para ajustarlo con las investigaciones de materia y radiación. Para terminar ésta sesión se muestra un video [37] que sintetiza el trabajo de Rutherford y su modelo atómico.

B.7. Sesión siete: Radiación y modelo atómico de Bohr [43]

Objetivo: Dar a conocer las implicaciones del modelo de Bohr en consecuencia de los

trabajos de Rutherford y Planck

Metodología

Iniciamos con la descripción de un cuerpo negro, retomando las ideas de Kirchhoff hasta la distribución de Planck y su cuanto de acción. Para representar el cuerpo negro se toma una cavidad esférica por donde pasa un rayo de luz, y esta es atrapada por muchos osciladores que tienen como característica la misma frecuencia [1]. Esta idea es basada en la transformación de la energía mecánica de los osciladores en calor, produciendo temperaturas muy altas.

Para describir éste fenómeno sobre la radiación se nombran los diferentes trabajos realizados por Wien, Stefan Boltzmann, Rayleigh Jeans y Planck, mostrando la distribución de energía y describiendo muy cualitativamente éstos resultados, hasta llegar a la constante que caracteriza el cuanto de acción de Planck.

Se realiza un resumen de los modelos atómicos ya expuestos en clase comenzando por Demócrito, Aristóteles, Dalton, Thomson y Rutherford. En éste cuadro se resalta las ideas principales que tenía cada autor, para compararlo con las teorías y establecer relaciones que diferencien cada modelo.

Para mostrar dicha relación entre modelos, se describe el átomo de Rutherford y su planteamiento. Es claro que la hipótesis generada por Rutherford, no satisface la estabilidad de la materia, pero si hay un auge conceptual. Estos auges están determinados en los cálculos que realizó sobre las órbitas donde viajan los electrones que envuelven al núcleo, y el tamaño del núcleo. Otro factor importante al que Rutherford se refiere es en la estructura atómica ya que para él, el átomo tiene regiones vacías y no macizas como Thomson y Dalton creía. Esta idea origino el modelo planetario del átomo.

En este momento entra en escena Niels Bohr, quien retoma el modelo planetario de Rutherford y lo reforma planteando sus tres postulados. El primero hace referencia al movimiento que realiza el electrón en orbitas circulares estacionarias sin perder energía en forma de radiación.

El segundo incluye al número cuántico principal n , que indica la distancia en que puede estar el electrón con referencia al núcleo y el tercero especifica la transición del electrón cuando absorbe o emite energía de un nivel de energía a otro. Con este postulado se explica las líneas presentes en el espectro del hidrógeno.

Además se explica las insuficiencias del modelo atómico de Bohr ya que solo se limita al átomo de hidrógeno, pero se resalta el nacimiento de la física cuántica y los nuevos modelos planteados en pro de la relación que existe entre la materia y la radiación.

B.8. Sesión ocho: Desarrollo de la espectroscopia [44]

Objetivo: Mostrar los hechos más significativos del estudio de la espectroscopia y sus métodos de obtención.

Metodología

Para ésta sesión se inicia observando la panorámica del colegio por medio de un prisma de vidrio relleno de agua, otro con glicerina y un prisma de acrílico. Aprovechándonos de la presencia del sol, observamos el espectro que genera éste por medio del prisma sobre el piso. La presentación fue orientada en los experimentos y descripciones que hizo Newton de la misma forma como se realizó anteriormente, (un prisma y luz solar). Luego se explica los experimentos realizados por Melville cuando calentaba sales y la

presencia del sodio en su espectro característico (espectro de emisión).

Luego prendimos un encendedor y por medio de fósforos se mostró que cada color tiene una temperatura determina. Esta afirmación se pudo obtener contando el tiempo que dura en encenderse cada cerilla. De esta forma se justifica los trabajos realizados por Herschel Cuando indico que los colores variaban su temperatura aumento éste valor del violeta al rojo.

Siguiendo en la misma secuencia, encontramos los espectros de absorción observados por Wollaston en el espectro solar y se nombra otra región que no se puede percibir por nuestros ojos. Esta región se le conoce infrarrojo descubierta por Ritter. Un avance sustancial lo consiguió Fraunhofer quien ubicó en una regleta que mostraba la longitud de onda, de esta manera situó las líneas más prominentes del espectro solar comenzando con la letra A hasta la G.

Dentro de las primeras teorizaciones se pueden resaltar los trabajos realizados por Kirchhoff y Bunsen, quienes afirman que el espectro es característico de cada sustancia, es como la huella digital y se muestra por medio de líneas espectrales ya sea en emisión como en absorción. Estas líneas deben tener una medida determinada, y para ello Angstrom encuentra su medida precisa que actualmente se utiliza. Valiéndose de la literatura un profesor de escuela [1] Balmer encuentra una expresión netamente empírica y experimentalmente Rydberg confirma éste valor que se acopla en la medición de las líneas espectrales presentes en cada sustancia.

Para finalizar se muestra las partes en que se divide el espectro electromagnético con sus aplicaciones en la industria.

B.9. Sesión nueve: Experimentos de espectroscopia (relación entre materia y radiación)[45]

Objetivo: Realizar prácticas experimentales donde se evidencie la presencia de líneas espectrales.

Metodología

Para realizar esta práctica experimental se oscureció el laboratorio y se quemaron varias sustancias de fácil adquisición como es la sal de cocina, café, color, cominos, canela, azúcar y sulfato de magnesio. Para la observación se fabricó espectroscopios caseros con un cd [19, 62] y se tomaron varias fotos del espectro generado por aquellas sustancias [17]. Como cierre de la unidad didáctica se elaboró una guía final para que los estudiantes la contestaran según lo comprendido a lo largo de las nueve sesiones de clase [64].

Bibliografía

- [1] Sánchez Ron José Manuel, *Historia de la Física Cuántica*, tomo I. Primera Edición. ED Critica Barcelona, 2001.
- [2] Garcia Castañeda Mauricio, De-Geus Jeannine Ewert. *Introducción a la física moderna*. Tercera Edición. Ed Universidad Nacional de Colombia pág.83-111, 2003.
- [3] Morcillo Rubio y Orza Segade. *Espectroscopia, estructura y espectros atómicos*. Primera Edición. ED Alambra (Madrid España), 1972.
- [4] Eisberg and Resnick. *Física cuántica, átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas*. ED Limusa.
- [5] Robert Eisberg. *Fundamentos de Física Moderna*. ED Limusa, 1973.
- [6] Isaac Newton. *A new theory about light and colors*. (versión corregida). Asociación americana ©1993 de los profesores de la física.
- [7] Physical Science Study Committee. *Física*. Editorial Bedout, 1964.
- [8] Eugene Hecht and Alfred Zajac. *Óptica*. Tercera Edición. ED Addison-Wesley Iberoamericana, 1977.

-
- [9] Sears Zemansky, *La física universitaria*. Editorial Addison Wesley Longman. Tomo II (cuarta edición).
- [10] Organista, Gómez, Jaimes y Rodríguez. *Una idea profunda en la comprensión del mundo físico: el principio de superposición de estados*. 10 de septiembre 2007.
- [11] Juan Miguel Campanario. *Científicos que cuestionan los paradigmas dominantes: algunas implicaciones para la enseñanza de las ciencias*. Revista electrónica de enseñanza de las ciencias Vol. 3.
- [12] Germán Bautista R. *Sobre la formación del profesional de la física*. Universidad Pedagógica Nacional Este artículo fue publicado en el departamento de física por "pre impresos" número 2 en noviembre de 1998.
- [13] Halliday, Resnick, Krane, *Física Volumen II*, Compañía Editorial, Mexico, 1997.
- [14] Serway Raymond A. *Física para ciencias e ingeniería con física moderna Volumen II*, McGraw Hill, 1999
- [15] ver presentacion 10
- [16] Damián H. Zanette *Quantum spectrum of a chain of oscillators*. Received 18 February 1993; accepted 4 October 1993).
- [17] ver presentacion 9
- [18] Alfred Leitner *The life and work of Joseph Fraunhofer (1787-1826)*. Department of Physics Rensselaer Polytechnic Institute Troy, New York 12181.
- [19] Web-site: http://www.cneq.unam.mx/programas/actuales/cursos_diplo/cursos/cursos_SEP/00/secundaria/mat_particip_secun/02_fisica/arch_

partic_fisica/S7P1.pdf

[20] ver video

[21] ver video

[22] Miguel y Julián de Zubiría. *Biografía del pensamiento, estrategias para el desarrollo de la inteligencia*. 1989. Libros para una educación mejor.

[23] Alberto Clemente de la Torre. *Física cuántica para filósofos*. La ciencia para todos (2000).

[24] Niels Bohr, traducido y notas por Miguel Ferrero. *La teoría atómica y la descripción de la naturaleza. Cuatro ensayos de una introducción*. Editorial alianza. 1988

[25] Marco Antonio Moreira. *Aprendizaje significativo critico. (Critical Meaningful Learning)*. Centro superior de estudios superiores La Salle, Madrid España, 2005.

[26] Web-site: <http://legacy.spitzer.caltech.edu/espanol//edu/ir/discovery.html>

[27] Web-site: http://legacy.spitzer.caltech.edu/espanol//edu/ritter/ritter_bio.html

[28] Web-site: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fraunhofer_lines.jpg?uselang=es

[29] Web-site: <http://blogs.eldiariomontanes.es/scientia-mater/2009/04/19/fisica-mentes-inquietas-temperatura-mas-alta-una/>

[30] Web-site: <http://www.youtube.com/watch?v=atYFsSksGa0>

-
- [31] Web-site: <http://www.youtube.com/watch?v=5777EfALW2A>
- [32] Web-site: <http://centros5.pntic.mec.es/ies.victoria.kent/Rincon-C/Curiosid2/rc-108/rc-108.htm>
- [33] Web-site: <http://www.youtube.com/watch?v=1dPv5WKBz9k&feature=related>
- [34] Web-site: <http://www.youtube.com/watch?v=BUbFiK1RMOQ>
- [35] Web-site: <http://www.youtube.com/watch?v=TSGujzTCm9Q>
- [36] Web-site: http://www.youtube.com/watch?v=HmsI7z6HM_U&feature=fvwrel
- [37] Web-site: <http://www.youtube.com/watch?v=WmyNUgK99sw&feature=related>
- [38] ver presentacion 1
- [39] ver presentacion 2
- [40] ver presentacion 3
- [41] ver presentacion 4
- [42] ver presentacion 5
- [43] ver presentacion 6
- [44] ver presentacion 7
- [45] ver presentacion 8
- [46] Reproducir video2
- [47] Reproducir video3

- [48] Reproducir video1
- [49] Reproducir video4
- [50] Web-site: <http://web.fccj.org/~ethall/gaslaw/gaslaw.htm>
- [51] Web-site: http://es.wikipedia.org/wiki/Jean_Perrin
- [52] Web-site: <http://www.profesorenlinea.cl/biografias/LavoisierAntoine.htm>
- [53] Web-site: <http://amdc.in2p3.fr/masstables/Ame2003/mass.mas03round>
- [54] Web-site: http://es.wikipedia.org/wiki/Unidad_de_masa_atC3B3mica
- [55] Web-site: http://en.wikipedia.org/wiki/William_Prout
- [56] Web-site: http://www.acenor.cl/acenor/pag.gral/documentos/Historia_Electricidad.htm
- [57] Web-site: <http://www.tochtli.fisica.uson.mx/electro/historia.htm>
- [58] Web-site: http://es.goldenmap.com/Historia_de_la_electricidad
- [59] Reproducir video5
Web-site: <http://www.youtube.com/watch?v=BUbFiKlRMOQ>
- [60] Web-site: <http://www.uv.es/~bertomeu/material/museo/GUIA7.html>
- [61] Reproducir video6
- [62] Web-site: http://gybugandofisica.scienceontheweb.net/Materiales/Construccion_Espectroscopio_casero.pdf

[63] Tina Blythe y colaboradores. *guía para el docente*. Editorial PAIDÖS.

[64] ver fotos

Declaración

Me permito afirmar que he realizado la presente tesis de manera autónoma y con la única ayuda de los medios permitidos y no diferentes a los mencionados en la propia tesis. Todos los pasajes que se han tomado de manera textual o figurativa de textos publicados y no publicados, los he reconocido en el presente trabajo. Ninguna parte del presente trabajo se ha empleado en ningún otro tipo de tesis.

Bogotá, D.C., dd.mm.aaaa

(Nombre del autor)